

MXene-CNT-WPU 복합소재 기반 면상발열체의 배합 비율에 따른 발열 특성

오호준¹, 닷꾸이응우엔^{1,2}, 이윤식¹, 최춘기^{1,2*}

¹한국전자통신연구원, ICT창의연구소, 소재부품원천연구본부, 그래핀연구팀
대전시 유성구 가정로 218

²과학기술연합대학원대학교, ETRI스쿨, ICT-차세대소자공학
대전시 유성구 가정로 217

(2022년 8월 10일 접수; 2022년 9월 5일 수정본 접수; 2022년 9월 5일 채택)

Heating Characteristics of Planar Heater Fabricated with Different Mixing Ratios of MXene-CNT-WPU Composites

Hyo-Jun Oh¹, Quy-Dat Nguyen^{1,2}, Yoonsik Yi¹, and Choon-Gi Choi^{1,2*}

¹Graphene Research Team, Materials and Components Research Division, ICT Creative Research Lab.,
Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI) 218 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34129, Republic of Korea

²ICT-Advanced Device Engineering, School of ETRI, University of Science and Technology (UST)
217 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Republic of Korea

(Received for review August 10, 2022; Revision received September 5, 2022; Accepted September 5, 2022)

요 약

본 연구는 1차원의 Carbon nanotube (CNT)와 2차원의 MXene을 최적의 비율로 배합한 우수한 전기전도성과 발열특성을 가진 저차원 복합소재 기반 면상발열체를 제안한다. CNT와 MXene을 친환경 소재인 Waterborne polyurethane (WPU)과 배합하되, MXene과 CNT의 중량비율을 3:1, 1:1, 1:3, 1:7, 1:14로 다르게 적용하고 WPU는 동일한 비율로 적용하였다. 그 결과, CNT 비율이 높을수록 면저항이 낮아지고 발열온도가 높아지는 것을 확인하였다. MXene과 CNT를 1:7, 1:14로 배합하는 경우 CNT-WPU 면상발열체보다 더 낮은 면저항과 높은 발열온도를 보여주었다. 이는 1차원 CNT와 2차원 MXene의 최적 배합으로 고밀도 네트워크가 형성되어 평평한 표면이 형성되기 때문이다. 위 우수한 전기적 특성을 가진 저차원 복합소재는 플렉서블 소자에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

주제어 : 면상발열체, 탄소나노튜브, 맥신, 수분산 폴리우레탄, 복합소재

Abstract : This study presents an excellent planar heater based on low-dimensional composites. By optimizing the ratio of 1D carbon nanotubes (CNT) and 2D MXene ($Ti_3C_2T_x$), it is possible to create a planar heater that has superior electrical conductivity and high heat generation characteristics. Low-dimensional composites were prepared by mixing CNT paste and MXene solution with eco-friendly waterborne polyurethane (WPU). In order to find the optimal mixing ratio for the MXene-CNT-WPU composites, samples with MXene to CNT weight ratios of 3:1, 1:1, 1:3, 1:7, and 1:14 were investigated. In addition to these different weight ratios, 5 wt% WPU was equally applied to each sample. It was confirmed that the higher the weight ratio of CNT, the lower the sheet resistance and the higher the heating temperature. In particular, when the MXene-CNT-WPU planar heater was fabricated by mixing MXene and CNT at a weight ratio of 1:7 and 1:14, the heating temperature was higher than the heating temperature of a CNT-WPU planar heater. These characteristics are due to the optimized mixture of the 1D materials (CNT) and the 2D materials (MXene) causing the formation of a flat surface and a dense network structure. The low-dimensional composites manufactured with the optimized mixing ratios found in this study are expected to be applied in flexible electronic devices.

Keywords : Planar heater, Carbon nanotubes, MXene, Waterborne polyurethane, Composites

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: cgchoi@etri.re.kr; Tel: +82-42-860-6834; Fax: +82-42-860-5211

doi: 10.7464/ksct.2022.28.4.278 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

면상발열체는 전도성 소재를 면상으로 얇게 형성하여 정격 전압의 인가에 의해 발열이 되도록 한 것으로서, 산업용 발열 모듈, 자동차용 발열유리, 의료용 발열패드, 스포츠용 및 군용 발열조끼, 생활가전용 발열기기 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 이러한 면상발열체는 유연 기판의 표면에 다양한 전도성 소재를 면상으로 코팅하는 방법으로 주로 제조되며, 최근에는 전도성 섬유를 직조하여 착용성을 더욱 향상시키는 등 다양한 제조방법이 개발되고 있다[1].

전도성 소재를 기판에 코팅하는 형태의 면상발열체는 후막의 저항을 이용한 것으로서, 전도성 소재에 따라 크게 금속 발열체, 비금속 발열체로 구분되며, 초기에는 철, 크롬, 니켈, 백금 등의 금속 박판을 에칭한 금속 발열체가 주로 개발 및 활용되었다[2].

그러나, 금속 발열체는 금속 박판을 에칭하여 제조해야 하므로 제조공정이 까다롭고 제조단가가 높으며 유연성과 착용성이 비교적 낮다는 문제점이 있다. 이에 반해 대표적인 비금속 발열체인 탄소 소재는 전도성이 우수할 뿐 아니라 금속 발열체에 비해 제조가 용이하고 제조가격이 전반적으로 비교적 저렴하다는 장점이 있어 활용이 점차 증가하고 있는 추세이다[3,4].

최근 저차원 소재를 기반으로 복합소재를 제조하여 다양한 산업 분야에 적용하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 저차원 소재를 이용하여 하이브리드를 형성하게 되면 각 소재의 물리적, 화학적 특성은 유지하면서도 복합적 결합을 통하여 단독 소재로는 얻을 수 없는 독특하면서도 우수한 물성을 도출하는 경우가 많다. 이러한 특징을 가진 저차원 복합소재 제조는 고기능성 신소재의 개발 측면에서 잠재력이 매우 큰 것으로 평가받고 있다[5].

본 논문에서는 전기적 특성이 우수한 1차원 소재인 Carbon nanotube (CNT), 2차원 소재인 MXene을 최적의 중량비율로 조합하고 Waterborne polyurethane (WPU)과 혼합한 저차원 복합소재를 이용하여 전기적 특성 개선에 효과적인 고밀도 네트워크 구조를 형성한 저차원 복합소재 기반 면상발열체의 발열 특성을 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 MXene-CNT-WPU 복합용액 제조

CNT (Trust Inc.)는 초순수에 0.7 wt% 단일벽 탄소나노튜브(single-walled carbon nanotube, SWCNT)를 분산시킨 페이스트 형태로 준비하고, 5 wt%의 수분이 포함된 WPU (Chemnine Inc.)는 초순수에 희석하여 사용하였다. MXene ($Ti_3C_2T_x$, InvisibleInc.)은 800°C에서 2시간 동안 열처리한 후, 초순수에 넣어 층간박리가 이루어지도록 하였다. 위 초순수를 진공여과로 제거하고, Dimethyl sulfoxide (DMSO, Daejung Chemicals & Metals Co., Ltd)에서 18시간 동안 교반한 뒤, 초순수로 반복세척하여 DMSO를 제거하였다. 초순수에 5 wt% 농도로 분산된 MXene을 저온 상태에서 초음파 세척기(Powersonic 605, Hwashin

Instrument Co., Ltd)로 6시간 동안 초음파 처리하여 MXene 용액을 제조하였다. 위의 CNT 페이스트, MXene 용액, WPU 용액을 혼합한 후, 초음파 처리하여 MXene-CNT-WPU 복합용액을 최종적으로 제조하였다.

2.2 MXene-CNT-WPU 면상발열체 제조

CNT 페이스트, MXene 용액, WPU 용액으로 이루어지는 MXene-CNT-WPU 복합용액은 건조된 샘플 기준의 중량비율로 혼합하여 준비하였고, MXene과 CNT의 중량비율을 3:1, 1:1, 1:3, 1:7, 1:14로 혼합하여 제조하였으며, WPU는 5 wt%로 적용하였다. MXene-CNT-WPU 복합용액은 폴리이미드 필름(Polyimide film, 두께: 0.125 mm, Daehyun ST Co., Ltd) 표면에 코팅하였으며, 길이 10 cm, 너비 2.2 cm의 면적을 1셀로 하여, 4개의 셀이 0.4 cm 간격으로 나란하게 배열된 형태로 코팅하였다. MXene-CNT-WPU 복합용액 코팅 후, 오븐에서 80°C로 건조한 다음, 각 셀의 양단을 silver paste로 연결하여 도포한 다음, 구리 테이프(Cu tape, 너비: 10 mm)를 부착하여 면상발열체를 제조하였다.

2.3 소재 및 특성 분석

MXene-CNT-WPU 복합소재의 형태, 구조를 상세하게 분석하기 위하여 주사전자현미경(Scanning electron microscopy, SEM, XL30 TMP, FEI company) 분석을 수행하였으며, 성분과 분포 확인을 위해 에너지 분산형 X-선 분광법(Energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS, Quantax 400, Bruker AXS Microanalysis)를 이용한 Mapping 분석과 함께 Raman (NT-NDT System) 분석도 수행하였다. 면저항은 4-point probe 시스템(CMT-series, Chang Min Co., Ltd)을 이용하여 측정하였다. 면상발열체의 발열온도는 직류전원공급기(PL-3005T, Protek)를 이용하여 정격전압을 인가하여 Joule 발열시험으로 수행하였으며, 발열온도는 적외선 카메라(Thermovision A40, FLIR Systems)를 이용하여 모니터링 및 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. MXene-CNT-WPU 복합소재의 결합형태 및 구조 분석

Figure 1은 MXene 용액, CNT 용액을 WPU 용액과 교반하여 MXene-CNT-WPU 혼합용액을 만들고 면상발열체를 제조하는 공정과, 면상발열체의 표면에 대한 SEM 이미지를 나타낸 것이다. WPU 용액은 유독한 용매를 사용하지 않고 물을 이용하여 폴리우레탄의 폴리머 체인(Polymer chain)을 균일하게 분산한 친환경 용액으로서, 초순수에서 균일하게 분산된 CNT 및 MXene 용액은 WPU 용액에서도 균일한 분산이 이루어진다[6,7].

위와 같이 균일하게 분산된 CNT-WPU 용액, MXene-WPU 용액을 폴리이미드 필름의 표면에 0.05~0.1 mm의 두께로 코팅 및 건조하여 제조한 면상발열체의 SEM 이미지를 살펴보면, CNT-WPU 면상발열체는 1차원 형태의 CNT가 서로 얽혀

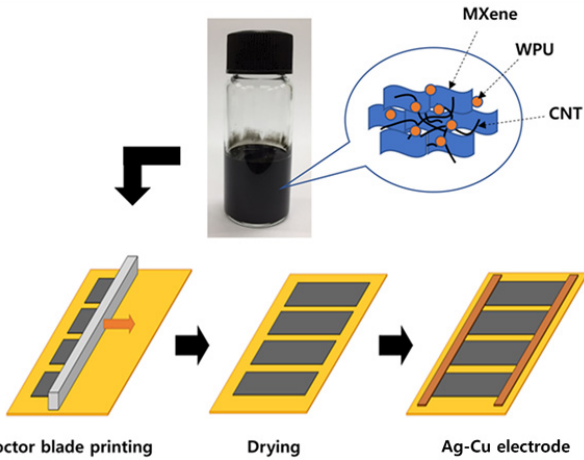


Figure 1. Fabrication process of MXene-CNT-WPU planar heater.

그물같이 긴밀한 네트워크 구조를 형성하고 있으며, 표면도 비교적 고르게 형성되어 있음을 알 수 있다. 다만, CNT-WPU 면상발열체는 1차원 형태의 CNT로만 구성되어 있어서 CNT 사이에 다수의 기공이 형성된 다공성 구조도 관찰되며, 기공은 약 20~80 nm의 직경으로 형성되는 것으로 관찰된다(Figure 2 (a-b))[8].

또한, MXene-WPU 면상발열체에 대한 SEM 이미지를 살펴보면, MXene은 2차원 형태로 형성된 다수의 단일층이 적층된 구조를 형성하는 것으로 관찰된다(Figure 2(c-d)). 이러한 구조는 3차원 형태의 MXene을 선택적으로 에칭하는 공정으로 2차원 형태를 형성하게 되는 것으로, 이러한 2차원 형태의 적층 구조로의 변화를 통해 전기적 특성이 더욱 개선된다[9-12]. 다만, MXene-WPU 면상발열체의 표면은 CNT-WPU 면상발열체에 비하여 매우 불균일하고 거칠기(roughness)가 높게 형성되는 것을 확인할 수 있는데, 이러한 표면의 높은 거칠기(roughness)는 면상발열체의 전기전도성을 크게 저하시키는 것으로 알려져 있다[13].

한편, MXene-CNT-WPU 면상발열체에 대한 SEM 이미지를 살펴보면, CNT-WPU 면상발열체에서 관찰되는 바와 같이 1차원 형태의 CNT가 서로 얽혀서 긴밀한 네트워크 구조를 형성하는 것을 확인할 수 있다. 또한 CNT-WPU 면상발열체의 표면과 비교할 때 거칠기(roughness)도 크게 차이가 나지 않는 것으로 판단된다(Figure 2(e-f)). 그러나 CNT-WPU 면상발열체에서는 다수의 기공이 관찰되지만, MXene-CNT-WPU 면상발열체에서는 기공을 찾기 어려울 정도의 고밀도 구조를 형성하고 있음을 알 수 있으며, 이러한 고밀도 구조는 1차원 형태의 CNT로 형성되는 그물형상의 긴밀한 네트워크 구조에 2차원 형태의 박리된 MXene이 효과적으로 결합되어 기공을 충전 및 커버링함으로써 형성되는 것으로 사료된다[14].

이와 같은 MXene-CNT-WPU 면상발열체의 구조적 특성을 더욱 상세하게 확인하기 위하여 실시한 Figure 3의 EDS mapping 결과를 살펴보면 MXene에 포함된 Ti(적색)가 균일하게 분산되어 있을 뿐 아니라 Ti와 C가 겹치는 부분(황색)도 균일하게 분산되어 있음을 확인할 수 있다. 이러한 EDS mapping 결과 분

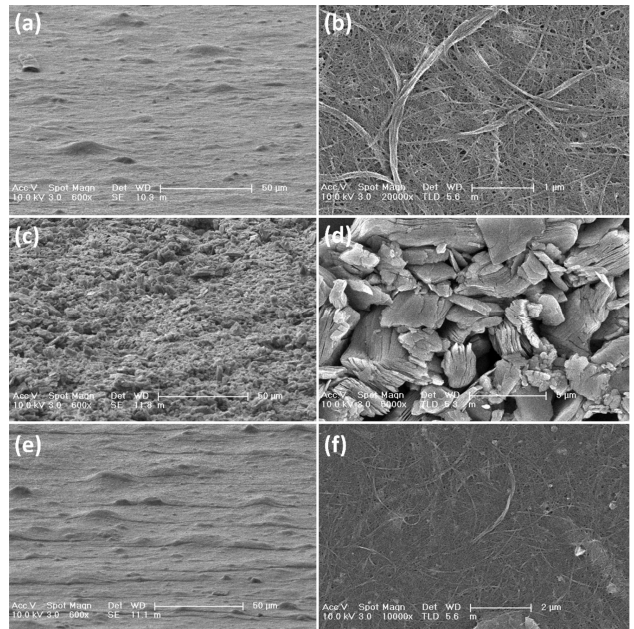


Figure 2. HR-SEM images of (a,b) CNT-WPU, (c,d) MXene-WPU, and (e-f) MXene-CNT-WPU composites.

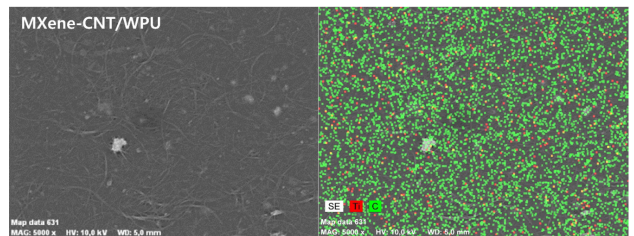


Figure 3. EDS mapping images of MXene-CNT-WPU planar heater.

석을 통해서 MXene-CNT-WPU 면상발열체는 CNT로 형성된 긴밀한 네트워크 구조에 2차원 형태의 MXene이 고르게 분산된 것임을 확인할 수 있다.

MXene-CNT-WPU 면상발열체의 구성 특성을 더 상세하게 확인하기 위하여 MXene-WPU, CNT-WPU, MXene-CNT-WPU 면상발열체에 대한 Raman 분석을 실시하였다(Figure 4). MXene-WPU에 대한 분석결과를 살펴보면, 200~800 cm^{-1} 범위에서 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 의 비화학양론적(Non-Stoichiometric) 특성을 보여주고 있음을 알 수 있으며, 1000~1800 cm^{-1} 에서 탄소의 D, G 밴드의 피크도 확인된다. 또한, CNT-WPU에서는 1580 cm^{-1} 부근에서 탄소의 G 밴드, 2696 cm^{-1} 부근에서 탄소의 G' 밴드, 1353 cm^{-1} 부근에서 탄소의 D 밴드 피크가 확인된다. 아울러, MXene-CNT-WPU에 대한 분석결과를 살펴보면, 200~800 cm^{-1} 에서 MXene의 비화학양론적(Non-Stoichiometric) 특성이 확인될 뿐 아니라 1000~1800 cm^{-1} 사이에서 CNT의 특성을 나타내는 D, G 밴드 피크가 모두 확인되므로 MXene-CNT-WPU 샘플은 MXene과 CNT가 복합되어 이루어진 구성임을 확인할 수 있다.

위와 같이 MXene-CNT-WPU 면상발열체에 대한 SEM 분석, EDS mapping 분석, Raman 분석을 통하여 MXene-CNT-WPU 면상발열체는 CNT로 형성되는 평평한 표면의 긴밀한 네트워

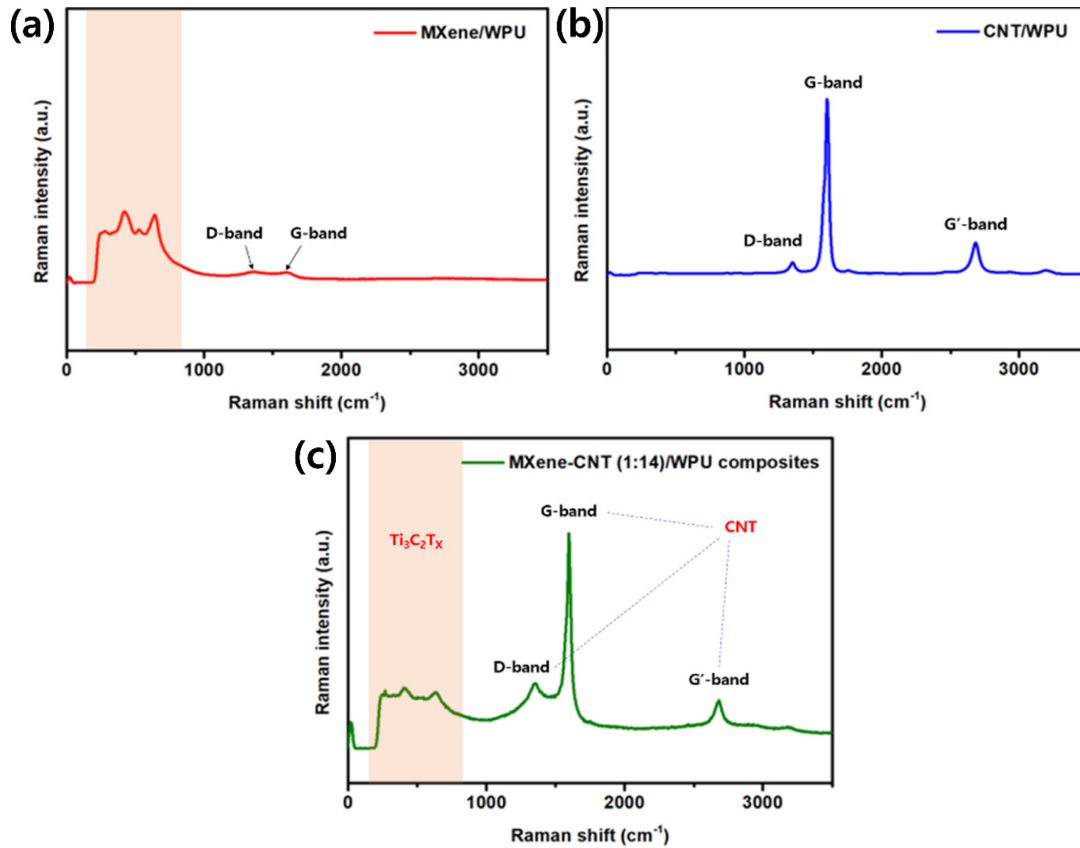


Figure 4. Raman analysis of (a) MXene-WPU, (b) CNT-WPU, and (c) MXene-CNT-WPU planar heater.

크 구조에 2차원 형태의 박리된 MXene이 긴밀하고 고르게 결합됨으로 인하여 형성되는 것으로 확인되며, 이러한 평평한 표면과 고밀도 결합구조는 면상발열체의 전기적 특성의 개선과 발열특성의 향상에 유리하게 작용한 것으로 추정된다[8].

3.2 MXene-CNT-WPU 복합소재 기반 면상발열체의 전기적 특성 분석

Figure 5는 MXene-CNT-WPU 기반 면상발열체의 면저항을 측정한 것으로, MXene과 CNT의 중량비율을 다르게 적용하여 제조한 면상발열체의 각 셀마다 일정 간격으로 3 point씩 측정하고 평균을 계산하였다. 먼저, MXene-WPU, CNT-WPU 면상발열체의 면저항을 측정하였고, MXene과 CNT의 중량비율을 3:1, 1:1, 1:3로 배합한 면상발열체의 면저항을 측정하였다.

MXene-WPU 면상발열체의 면저항은 평균적으로 $4593.25 \pm 1751.77 \Omega/\text{sq}$ 로 매우 높게 측정되고, CNT-WPU 면상발열체의 면저항은 평균 $2.08 \pm 0.06 \Omega/\text{sq}$ 로서 비교적 낮게 측정되는데, 이러한 면저항 측정값의 차이는 위 3.1에서 면상발열체의 SEM 이미지를 이용한 형태적 분석과 표면 상태의 차이로 추론했던 내용과 전반적으로 일치하며, 긴밀한 결합구조와 평평한 표면은 전도성 필름의 전기적 특성을 개선하는 요소임을 실험을 통하여 확인된다.

또한, MXene과 CNT의 배합비율을 다르게 적용하여 제조한 면상발열체의 경우, 3:1의 중량비율로 제조한 샘플은 $7.73 \pm 3.22 \Omega/\text{sq}$ 의 면저항을 나타내었고, 1:1의 중량비율로 제조한

샘플의 면저항은 $3.49 \pm 0.95 \Omega/\text{sq}$ 으로 측정되었으며, 1:3의 중량비율로 제조한 샘플의 면저항은 $2.19 \pm 0.22 \Omega/\text{sq}$ 의 면저항을 나타내어 CNT의 중량비율이 증가할수록 면저항이 더욱 낮아지는 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다.

위와 같은 측정결과를 통하여, MXene-CNT 복합소재 기반 면상발열체에서 CNT의 중량비율이 증가할수록 소재 사이의 연결구조가 더욱 긴밀하게 이루어지며 이와 함께 MXene 중량비율의 감소에 따른 표면 거칠기(roughness)의 개선으로 인해 면저항이 낮아지는 것으로 사료된다.

한편, MXene의 비율을 더욱 낮추어 MXene과 CNT의 중량비율을 1:7로 배합하여 면상발열체를 제조하는 경우, 면저항이 $1.94 \pm 0.09 \Omega/\text{sq}$ 로 측정되어 CNT-WPU 복합소재로 제조한 면상발열체의 면저항($2.08 \pm 0.06 \Omega/\text{sq}$)보다 더 낮게 측정됨을 알 수 있으며, MXene과 CNT의 중량비율을 1:14로 배합하여 면상발열체를 제조하는 경우, 면저항이 $1.59 \pm 0.05 \Omega/\text{sq}$ 로 더욱 낮아짐을 알 수 있다.

즉, MXene과 CNT의 중량비율을 3:1, 1:1, 1:3로 배합하는 경우에는, CNT의 비율 증가에 따른 면저항의 뚜렷한 감소로 전기적 특성 변화에 있어서 MXene의 역할은 판단하기 어려우나, 1:7, 1:14와 같이 MXene를 적은 양으로 첨가하는 경우, CNT-WPU 면상발열체보다 더욱 낮은 면저항을 보여주므로, 일정 비율 이하에서 소량 첨가하는 MXene은 CNT-MXene/WPU 면상발열체의 전기적 특성 개선에 기여하는 것으로 판단된다. 이러한 독특한 경향에 대하여 아래에서 상세하게 살펴보고자 한다.

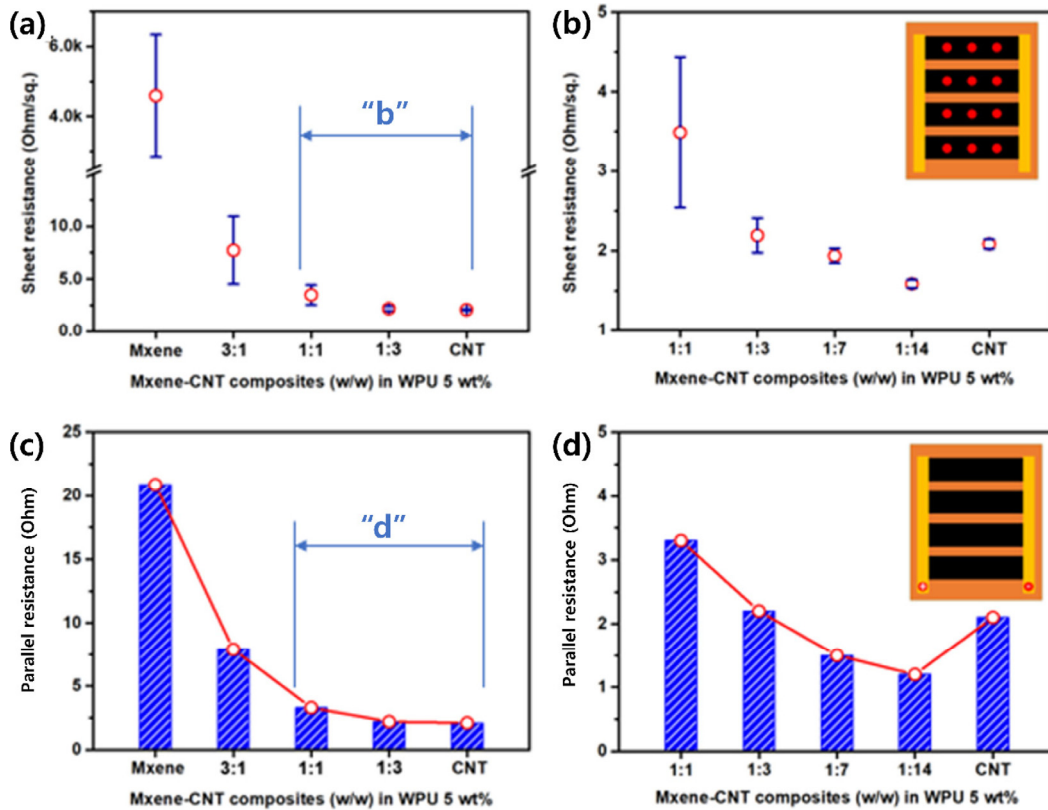


Figure 5. Electrical resistances of MXene-CNT-WPU planar heater: (a-b) sheet resistances, (c-d) parallel resistances.

먼저, MXene과 CNT는 일반적으로 전기전도도가 각각 5000 S/cm, 6000 S/cm로서 모두 전기적 특성이 우수하나, 본 연구에서는 MXene의 면저항은 CNT의 면저항에 비하여 현저하게 높게 나타나는데, 이러한 경향은 표면 거칠기(roughness)와 매우 밀접한 관계에 있으며 이것이 첫 번째 요인으로 사료된다. 즉, MXene의 중량비율이 감소함에 따라 표면 거칠기(roughness)가 낮아지면서 면저항도 낮아지게 되는 것으로 추정된다[13]. 또, 표면 거칠기(roughness)가 서로 비슷하게 형성될 경우에는, 필름을 구성하는 구성요소의 긴밀한 결합구조와 밀도가 전도성을 결정하는 요소로 작용하게 되는데, 1차원 소재인 CNT와 2차원 소재인 MXene이 1:7, 1:14의 중량비율에서는 서로 긴밀하게 결합되면서 고밀도 구조를 형성함에 따라 전하 이동이 더욱 쉽게 이루어지는 것으로 사료된다[14].

3.3 MXene-CNT/WPU 복합소재 기반 면상발열체의 발열 특성 분석

위와 같이 배합비율에 따라 서로 다른 전기적 특성을 나타내는 MXene-CNT-WPU 면상발열체에 3.6 V의 정격전압을 동일하게 인가하여 발열상태를 측정 및 분석하였다(Figure 6).

먼저, MXene-WPU 면상발열체는 발열이 이루어지지 않았으며, CNT-WPU 면상발열체의 경우, 초기 60 s까지는 56°C로 급격하게 승온되고, 이후에는 일정한 수준으로 유지되어 150 s에는 62°C로 발열되는 것을 확인하였다.

또한, MXene과 CNT의 중량비율을 다르게 적용하는 경우, 3:1, 1:1, 1:3, CNT의 순으로, CNT의 중량비율이 증가할수록

60 s 시점에서는 30, 43, 50, 56°C로 증가하는 경향을 보여주었으며, 150 s 시점에서는 30, 48, 56, 62°C로 증가하는 경향을 보여주어, CNT의 중량비율이 증가할수록 초기 승온속도가 더욱 빠르게 이루어지고, 발열온도도 더욱 높아짐을 확인된다. 이러한 초기 승온속도 및 발열유지온도의 변화경향은 면저항의 변화경향과 일치하므로, 면상발열체의 승온속도 및 발열온도는 면저항과 밀접한 상관관계에 있음을 확인할 수 있다[15].

한편, MXene의 비율을 더욱 낮추어 MXene과 CNT의 중량비율을 1:7로 배합하여 면상발열체를 제조하는 경우, 초기 60 s에는 65°C로 승온된 이후, 150 s에는 74°C로 발열됨을 확인하였으며, 1:14로 배합하여 면상발열체를 제조하는 경우, 초기 60 s에는 73°C, 150 s에는 85°C로 발열되어, CNT-WPU 면상발열체의 발열온도(60 s - 56°C, 150 s - 62°C)에 비하여 승온속도가 더욱 빠르고, 발열온도 또한 더욱 높게 도달하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 경향은 면저항의 변화 경향과도 일치하여 승온속도 및 발열온도는 면저항과 밀접한 상관관계가 있음을 재확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 1차원 소재인 CNT를 기반으로 하는 면상발열체에 있어서, 2차원 소재인 MXene의 배합비율에 따른 전기적 특성 및 발열특성을 확인하였다. MXene-WPU 면상발열체의 면저항은 매우 높아서 발열이 이루어지지 않았지만, MXene과 CNT의 배합비율을 3:1, 1:1, 1:3으로 다르게 할 경우, CNT

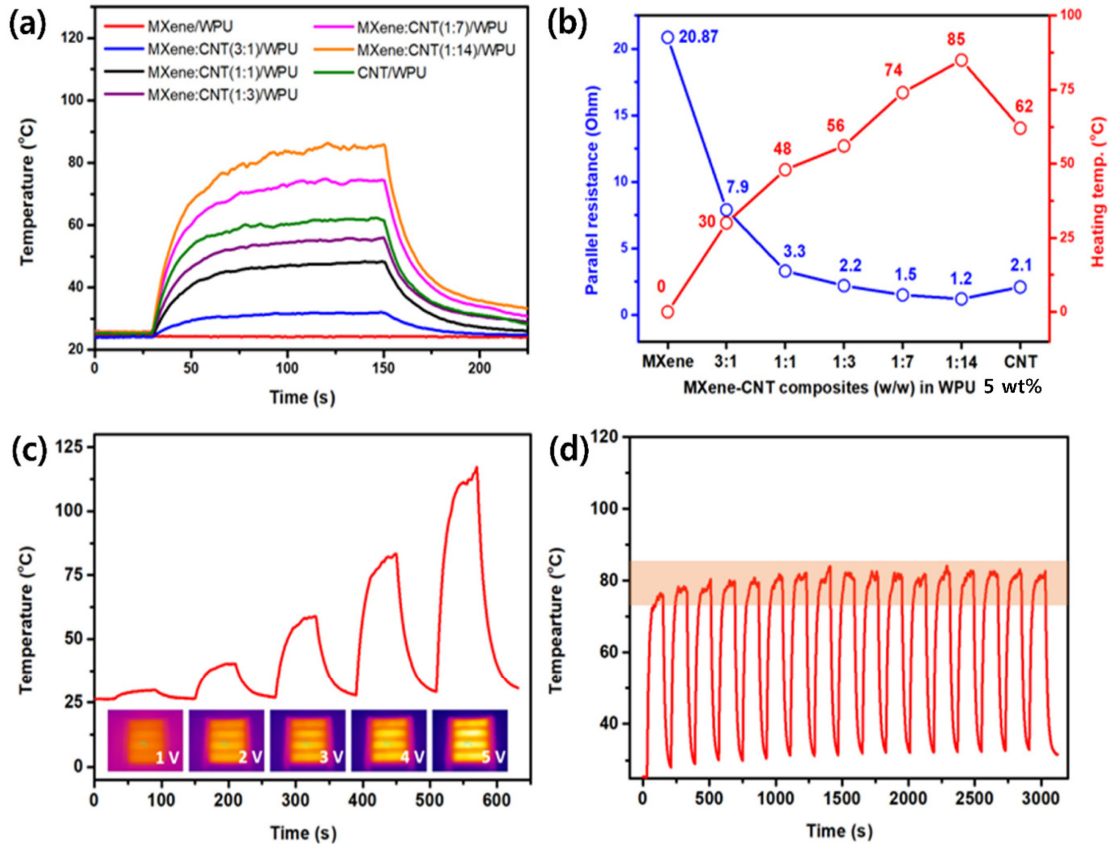


Figure 6. Electrical and heating characteristics of MXene-CNT-WPU planar heater prepared with different mixing ratio: (a) heating temperatures (3.6 V), (b) relation of sheet resistances and heating temperatures, (c) changes in the heating temperatures as the different voltages, and (d) stability of heating temperature (3.6 V).

의 배합비율이 증가할수록 면저항이 낮아지면서 승온속도 및 발열온도가 일정하게 증가하는 경향을 확인할 수 있었으며, CNT-WPU 면상발열체의 면저항이 가장 낮았고, 초기 승온속도와 발열온도가 가장 높은 것으로 확인되었다.

한편, MXene와 CNT의 배합비율을 1:7, 1:14와 같이, MXene의 중량비율을 매우 낮게 적용하는 경우, CNT-WPU 면상발열체에 비하여 면저항이 더욱 낮아지고, 초기 승온속도 및 발열온도가 더욱 높아지는 현상을 확인하였다. 이러한 현상은 MXene의 중량비율 조절에 따른 표면 형태의 개선과 함께 1차원 소재와 2차원 소재의 고밀도 결합구조 때문인 것으로 판단된다. 이러한 현상을 통하여 MXene-CNT 복합소재를 제조하여 적용하는 데 있어서, 다양한 응용 유연 필름 분야에 효과적으로 적용 가능할 것으로 기대된다.

감 사

본 연구는 산업통상자원부 및 방위사업청의 민군기술협력사업(과제번호: 18CM5084)의 지원에 의하여 수행되었음.

References

- Hao, L., Yi, Z., Li, C., Li, X., Yuxiu, W., and Yan, G., "Development and characterization of flexible heating fabric based on conductive filaments", *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, **45**(7), 1855-1865 (2012).
- Lee, S. H., Kim, S. W., Park, C. W., Jeong, H. E., Ok, J. G. and Kwak, M. K., "Scalable fabrication of flexible transparent heaters comprising continuously created metallic micromesh patterns incorporated with biomimetic anti-reflection layers", *Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Tech.*, **4**, 177-181 (2017).
- Xiao, Z., Guo, R., He, X., Gan, Y., Zhang, J., Huang, H., Zhang, W., Wang, B., Han, Y., and Xia, Y., "Polybenzimidazole/Conductive Carbon Black Composite Driven at Low Voltage for High-Temperature Heaters", *J. Electron. Mater.*, **51**, 2652-2662 (2022).
- Jeong, K. and Kim, Y.-H., "A Study on the Preparation and Purification Characteristics of Graphene Oxide by Graphite Type", *Clean Technol.*, **27**(2), 132-138 (2021).
- Wu, S.-W., Chang, T.-C., Lin, Y.-H., Chen, H.-F., and Fuh, Y.-K., "Fabrication of copper powder hybrid supported fillers with interconnected 1D/2D/3D nanostructures for enhanced thermal interface materials properties", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **121**, 3453-3462 (2022).
- Bernard, C., Goodwin Jr., D. G., Gu, X., Celina, M., Nyden, M., Jacobs, D., Sung, L. and Nguyen, T., "Graphene oxide/waterborne polyurethane nanocoatings: effects of

- graphene oxide content on performance properties”, *J. Coatings Tech. Res.*, **17**, 255-269 (2020).
7. Sur, S.-H., Lee, Y.-H., Park, C.-C., and Kim, H.-D., “Comparison of Properties of Waterborne Polyurethanes Containing Various Polyols”, *Clean Technol.*, **24**(3), 190-197 (2018).
 8. Tian, Y., Guo, N., Wang, W.-Y., Geng, W., Jing, L.-C., Wang, T., Yuan, X.-T., Zhu, Z., Ma, Y. and Geng, H.-Z., “Bilayer and three dimensional conductive network composed by SnCl₂ reduced rGO with CNTs and GO applied in transparent conductive films”, *Sci. Rep.*, **11**, 9891 (2021).
 9. Wang, L., Chen, L., Song, P., Liang, C., Lu, Y., Qiu, H., Zhang, Y., Kong, J., and Gu, J., “Fabrication on the annealed Ti₃C₂TX MXene/Epoxy nanocomposites for electromagnetic interference shielding application”, *Compos. B Eng.*, **171**, 111-118 (2019).
 10. Yun, T., Kim, H., Iqbal, A., Cho, Y. S., Lee, G. S., Kim, M.-K., Kim, S. J., Kim, D., Gogotsi, Y., Kim, S. O., and Koo, C. M., “Electromagnetic Shielding of Monolayer MXene Assemblies”, *Adv. Mater.*, **32**, 1906769 (2020).
 11. Ji, B., Fan, S., Ma, X., Hu, K., Wang, L., Luan, C., Deng, J., Cheng, L., and Zhang, L., “Electromagnetic shielding behavior of heat-treated Ti₃C₂T_X MXene accompanied by structural and phase changes”, *Carbon*, **165**, 150-162 (2020).
 12. Seredych, M., Shuck, C. E., Pinto, D., Alhabeb, M., Precetti, E., Deysher, G., Anasori, B., Kurra, N., and Gogotsi, Y., “High-temperature behavior and surface chemistry of carbide MXenes studied by thermal analysis”, *Chem. Mater.*, **31**, 3324-3332 (2019).
 13. Oh, H.-J., Dao, V.-D., and Choi, H.-S., “Electromagnetic shielding effectiveness of a thin silver layer deposited onto PET film via atmospheric pressure plasma reduction”, *Appl. Surf. Sci.*, **435**, 7-15 (2018).
 14. Isa, S. S. M., Ramli, M. M., Jamlos, M. F., Hambali, N. A. M. A., Isa, M. M., Kasjoo, S. R., Ahmad, N., Nor, N. I. M., and Khalid, N., “Multi-Walled Carbon Nanotubes on Plastic NH₃ Gas Sensor”, Paper No. 020030, Asian Conference on Chemical Sensor, Penang, Malaysia (Nov. 2015).
 15. Jo, H. S., An, S., Lee, J.-G., Park, H. G., Al-Deyab, S. S., Yarin, A. L., and Yoon, S. S., “Highly flexible, stretchable, patternable, transparent copper fiber heater on a complex 3D surface”, *NPG Asia Mater.*, **9**, e347 (2017).