

[Original Article]

A study on thermal and electrical properties of molybdenum sputtered clothing materials

Hye Ree Han[†]

Lecturer, Dep. of Clothing and Textiles, The Catholic University of Korea,
Korea

몰리브덴 스퍼터링 처리 의류소재의 열적 특성과 전기적 특성에 관한 연구

한 혜 리[†]

가톨릭대학교 의류학과 강사

Abstract

Molybdenum is used in electrical contacts, industrial motors, and transportation materials due to its remarkable ability to resist heat and corrosion. It is also used to flame coat other metals. This study investigated, the thermal characteristics of the molybdenum sputtered material, such as electrical conductivity, and stealth effects on infrared thermal imaging cameras. To this end, molybdenum sputtered samples were prepared by varying the density of the base sample and the type of base materials used. Thereafter, the produced samples were evaluated for their surface state, electrical conductivity, electromagnetic field characteristics, thermal characteristics, stealth effect on infrared thermal imaging cameras, and moisture characteristics. As a result of infrared thermal imaging, the molybdenum layer was directed towards the outside air, and when the sample was a film, it demonstrated a greater stealth effect than the fabric. When the molybdenum layer was directed to the outside air, all of the molybdenum sputtering-treated samples exhibited a lower surface temperature than the "untreated sample." In addition, as a result of confirming electrical properties following the molybdenum sputtering treatment, it was determined that the film exhibited better electrical conductivity than the fabric. All samples that were subjected to molybdenum sputtering exhibited significantly reduced electromagnetic and IR transmission. As a result, the stealth effect on infrared thermal imaging cameras is considered to be a better way of interpreting heat transfer than infrared transmission. These results are expected to have future applications in high-performance smartwear, military uniforms, and medical wear.

Received December 19, 2021

Revised January 31, 2022

Accepted February 04, 2022

[†] Corresponding author
(luckyherry@hanmail.net)

ORCID

Hye Ree Han

<https://orcid.org/0000-0002-3614-7384>

Keywords: molybdenum(몰리브덴), heat transfer(열전달), sputtering(스퍼터링), IR camera(적외선 카메라), electrical conductivity(전기전도성)

I. Introduction

몰리브덴(Molybdenum, Mo)은 내열성 및 내식성 등이 강하고, 전기 접점, 산업용

모터, 필라멘트, 운송 자재 등에 사용된다. 또한 다른 금속을 화염 코팅하는 데도 사용된다. 다양한 폴리브렌의 특성으로 인해 폴리브렌 산화물, 광학, 전자, 촉매, 바이오 및 에너지 시스템, 전계효과 등에 관한 다양한 연구가 있다(Ashida, Arashiba, Nakajima, & Nishibayashi, 2019; Castro et al., 2017; Cheng et al., 2018; Han et al., 2018; Hou et al., 2019; Rana et al., 2020; Raza, Mebarek-Oudina, & Chamkha, 2019; Sangwan et al., 2018; Zang et al., 2019). 선행연구에서, 폴리브렌 기반 전기 촉매는 광범위한 pH 범위에서 높은 활성도와 안정성 때문에 값비싼 Pt 기반 촉매를 대체할 유망한 후보로 간주되고 있다고 설명하였다(Hua, Sun, Xu, & Wang, 2020).

또한 스퍼터링 기술은 물 사용량이 거의 없어 코팅 기술 중 친환경적이고, 옴스트롱 수준으로 얇게 금속을 도포할 수 있다는 장점을 지니고 있어 스퍼터링을 활용하여 전기전도성, 광학적 특성, 스마트 텍스타일, 호흡 모니터링을 위한 센서, 금속 배터리, 덴탈 임플란트, 젖음성 등을 연구한 사례가 많이 있다(Bae, Yang, & Choi, 2013; Dehghan, Shi, Woodrum, Brewer, & Sacks, 1994; Depla, Segers, Leroy, Hove, & Parys, 2011; Green, Gruen, Schreiner, & Lerner, 1974; Han, 2021; Hao et al., 2019; He et al., 2019; Jones, Camino, Teer, & Jiang, 1998; Lai, Tsai, Hung, & Feng, 2014; Ma et al., 2020; Pastel & Rawal, 2016; Qi et al., 2002; Shahidi & Ghoranneviss, 2015; Shi, Woodrum, Dehghan, Brewer, & Sacks, 1992; Su, Peng, & Lee, 2010; Wu et al., 2019; Yuan, Wei, Chen, & Xu, 2015). 선행연구에서는 금속 스퍼터링 직물을 활용하여 적외선 열화상 카메라에 대한 스텔스 기술과 IR 투과 특성, 열적 특성 등을 연구한 결과, 금속 층 방향이 외기를 향할 때 스텔스 효과를 발현하였고, 직물 상태에 따라 스텔스 효과가 변화하였다(H. R. Han, 2019).

또한 선행연구에서 다양한 종류의 시료들(PET fabric, nylon fabric, laminated PET fabric, nylon blended wool fabric, cotton fabric, silk fabric)을 선정하여 알루미늄 스퍼터링 처리한 후 스텔스 효과를 살펴보았다. 그 결과 미처리 시료와 스퍼터링 시료와의 적외선 열화상 이미지에 대한 Lab를 측정된 결과, ΔE 값 차이가 31.0~90.4 정도로 크게 나타나며, 스텔스 효과를 입증하였다. 필라멘트 섬유를 사용한 직물(PET,

nylon, laminated PET, silk)이 스테이플 섬유(nylon blended wool, cotton)를 사용한 직물보다 다소 낮은 표면온도를 보였는데, 이는 섬유가 매끈할수록 알루미늄 스퍼터링 층이 균일하게 도포되어, 열전달이 더욱 빠르고 효율적으로 이루어져서, 은닉효과가 좋은 것으로 판단된다고 하였다. 그리고 중간에 스퍼터링 알루미늄 층이 삽입된 샌드위치 모델(nylon layer-Al layer- nylon layer)의 경우에도 은닉효과를 보이지 않았다고 설명하였다(H. R. Han, 2019).

한편, 다른 선행연구에서는 W-doped VO₂(M)을 면직물 위에 코팅하여 스텔스 패브릭을 제조하였다. 그 결과, 제작된 직물은 낮은 적외선 복사 강도를 나타내고, 열 적외선 스텔스 성능을 보여주었다(Mao et al., 2014).

4차 산업혁명과 정보기술(IT) 기기 증가로 다양한 분야(헬스케어, 피트니스 등)에서 금속 스퍼터링 처리 소재, 디지털 패션 등에 대한 관심이 높아지고 있다(Chen, Yang, & Lee, 2021; H. Han, 2019; Im & Ko, 2017; Jeong et al., 2018; Kang & Kwon, 2021). 특히 군사 분야에서는 적외선 열화상 카메라에 숨겨진 효과가 있는 의류의 중요성이 대두되고 있다. 또한 난입 증가로 전자파 차단물질에 대한 관심도 증가하고 있다. 그리고 첨단 기술을 의류에 접목시킨 연구가 증대됨에 따라 전기 전도성 물질에 대한 연구가 지속적으로 증가하고 있는 실정에서 금속 스퍼터링 처리 연구에 대한 관심이 증대되고 있다.

따라서 본 연구에서는 필름과 직물에 폴리브렌 스퍼터링 처리 후 표면 변화, 전기전도도, 전자파 차단 성능, IR 투과 성능, 적외선 열화상 카메라에 미치는 스텔스 기능, 수분특성 등을 연구하였다. 이를 위해 바탕 직물의 종류를 달리하였고(nylon, PET, cotton, silk), 밀도, 기공 변화에 따른 특성 변화 등을 살펴 보기 위해 Nylon을 필름, 직물, 망사1, 망사 2로 나누어 폴리브렌 스퍼터링 처리를 실시하여 연구하였다. 그리고 연구 결과를 통해 첨단 스마트 원단, 군복, ICT 분야 및 의료 센서 적용 여부 등을 고찰해 보았다.

II. Experiment

1. Materials

본 연구에 사용된 base fabric은 Nylon(film, fabric,

mesh1, mesh2), PET fabric, cotton fabric, silk fabric 이다. 시료들의 특성은 <Table 1>과 같다.

Base fabric에 행해진 몰리브덴 스퍼터링 조건은 <Table 2>와 같다. Sputter coater(SRN120, SORONA, Korea)기기로 몰리브덴 스퍼터링이 행해질 때, 스퍼터링 시료는 원형모형으로, 지름은 19.5cm이었다. 스퍼터링 과정 도식화는 <Fig. 1>과 같다.

2. Characterization

표면특성의 경우(surface characteristics), 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, Hitachi, S-4800, Japan)을 사용하여 스퍼터링 전후 표면 상태를 관찰하였다. 또한 표면에 몰리브덴이 잘 코팅되었는지 확인하기 위해 EDS(EDS Oxford instruments, UK)와 FE-SEM(Field Emission Scanning Electron Microscope, Jeol, JSM 7401F, Japan)도 활용하였다.

그리고 전기 전도성(electrical conductivity)은 Digital multimeter(Bluetooth Digital Multimeter, OWON D35T,

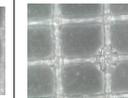
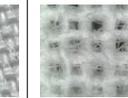
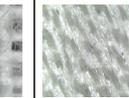
Fujian Lilliput Optoelectronics Technology Co., Ltd. China)를 사용하여 스퍼터링처리 전후의 표면 저항을 측정하였다.

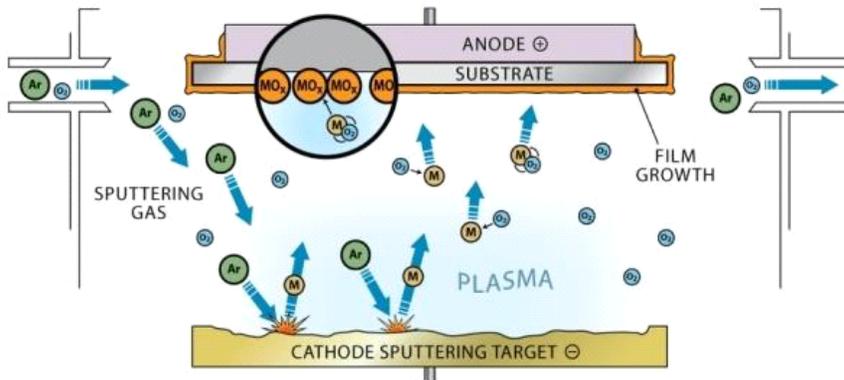
또한 전자파 차폐 성능(blocking of electromagnetic waves)은 Electromagnetic field tester(Smart EM checker FEC-001, FTlab, Korea & China)를 활용하여 몰리브덴 스퍼터링 처리에 의한 전자파 투과 정도를 측정하였다.

<Table 2> Sputtering condition

Time (minute)	10
Temperature	Room temperature
Process pressure	6m torr
Gas	Ar 40 sccm
Power	DC 500W
Machine	SRN-120

<Table 1> Characterization of base fabrics

Base materials	Nylon film	Nylon fabric	Nylon mesh1	Nylon mesh2	PET fabric	Cotton fabric	Silk fabric
Sample thickness (mm)	0.07	0.15	0.09	0.15	0.06	0.15	0.14
Weave type	Film	Plain	Plain mesh	Plain mesh	Plain	Plain	Twill
							



<Fig. 1> Schematicization of the sputtering process

Reprinted from ALCA technology. (2019). <https://www.alcatechnology.com>

IR 투과성능은 IR intensity tester(infrared emitting diodes, 5mm Infrared LED, T-1 3/4 IR333-A, EVERLIGHT, Taiwan)를 사용하여 실시하였다. 조사되는 IR 강도는 200W/m²이었고, 주요 IR wavelength는 940nm이었다.

그리고 열적특성(thermal characteristics)은 IR Thermographic camera(Flir i7)를 활용하였고, 적외선 열화상 카메라에 대한 스텔스 효과와 LAB 측정은 Image J 프로그램과 Colorinspector 3D를 활용하였다. 특히 L*, a*, b* 값은 Image J, Colorinspector 3D 소프트웨어를 사용하여 정량적 색 변화를 관찰하였고, 측정된 데이터에서 ΔL , Δa , Δb , ΔE 를 계산하였다. ΔL , Δa , Δb , ΔE 는 다음 방정식을 사용하여 계산되었다(Habekost, 2013; H. R. Han, 2019).

$$\Delta L = L_{treated} - L_{untreated} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\Delta a = a_{treated} - a_{untreated} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\Delta b = b_{treated} - b_{untreated} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (\text{Eq. 4})$$

Each parameter in Eqs. (1)-(4) are defined below.

$L_{untreated}$: Value L of untreated sample

$L_{treated}$: Value L of sputtered sample

$a_{untreated}$: Value a of the untreated sample

$a_{treated}$: Value a of the sputtered sample

$b_{untreated}$: Value b of the untreated sample

$b_{treated}$: Value b of the sputtered sample

〈Eq. 1〉에서는 스퍼터링 원단의 ‘L’ 값에서 처리되지 않은 원단의 ‘L’ 값을 빼서 스퍼터링 가공으로 인한 ‘L’ 값의 변화를 보여준다. CIELAB 색공간에서 ‘L(빛)’은 밝기의 정도를 나타내며, 〈Eq. 2〉는 스퍼터링 가공에 따른 ‘a’ 값의 변화를 스퍼터링 원단의 ‘a’ 값에서 처리되지 않은 원단 ‘a’를 빼서 보여준다. CIELAB 색공간에서 ‘a’는 적녹색 정도를 나타내며, 〈Eq. 3〉은 스퍼터링 원단의 ‘b’ 값에서 처리되지 않은 원단의 값 ‘b’를 빼서 스퍼터링에 의한 값 변화를 보여준다. CIELAB 색 공간에서 ‘b’는 노란색과 파란색의 정도를 나타낸다. 그리고 〈Eq. 4〉의 ‘E’는 CIELAB 색 공간의 샘플 간 실제 차이인 색상 차이를 합한 것이다.

또한 스퍼터링 전후의 쾌적성능을 평가하기 위해 접촉각도 측정하였으며, 측정시 syringe(BD ultrafine™ II, Becton, Dickinson and Company, USA)를 사용하여 측정하였다.

III. Results and Discussions

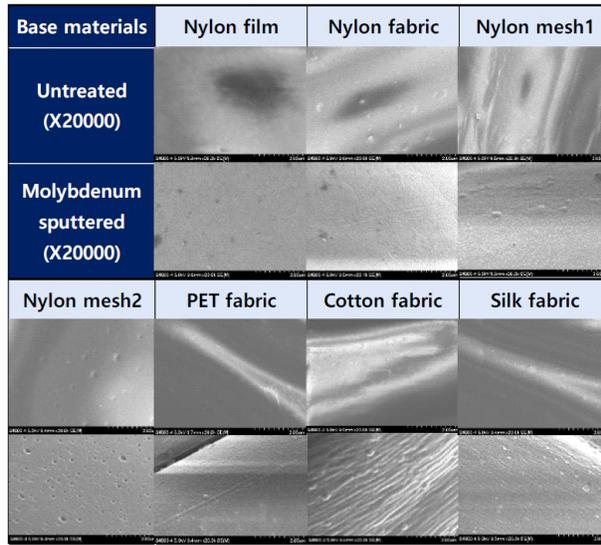
1. Surface and Add-on characteristics

몰리브덴 스퍼터링 처리된 시료의 표면상태를 확인하기 위해 Scanning Electron Microscope 촬영을 실시하였다(Fig. 2). SEM으로 20,000배 확대하여 살펴 보았을 때, Base fabric에 상관없이 미처리 시료는 표면이 매끈한 것에 비해 스퍼터링 처리 시료는 표면에 몰리브덴이 형성된 것을 확인할 수 있었다. 또한 EDS 결과에서 확인할 수 있듯이, 몰리브덴 스퍼터링 처리한 나일론 시료의 표면에 몰리브덴 물질이 검출된 것을 그래프로 확인할 수 있었다. EDS 결과, 몰리브덴이 78.63Wt% 검출되었다. 이외에는 C(11.76Wt%), O(8.94Wt%)가 검출되었는데, 이는 EDS 사용시 빔이 몰리브덴 층을 뚫고 들어가 나일론 층까지 검출했기 때문으로 판단된다. Cu(0.67Wt%)가 소량 발견된 것은 EDS 작업을 위해 사용한 홀더에서 검출된 것으로 판단된다. 다른 선행연구에서도 금속 스퍼터링 처리 후 FE-SEM 촬영을 하면 미처리 시료에서는 발견할 수 없었던 금속이 표면에 형성된 것을 관찰할 수 있었다(H. R. Han, 2019).

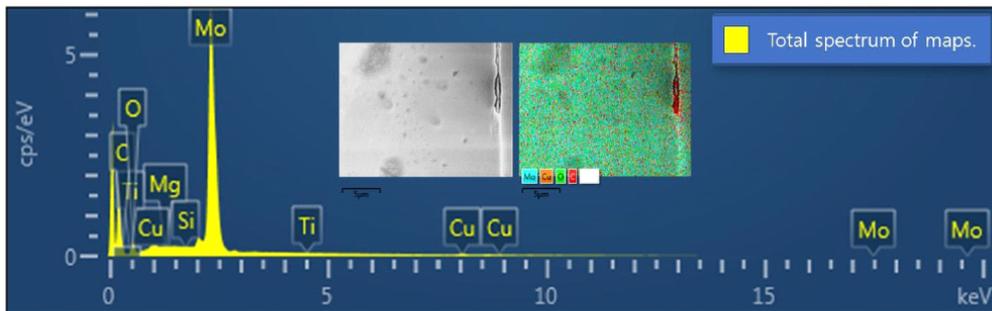
몰리브덴 스퍼터링 처리 전후 시료의 무게(g) 측정 값과 Add-on ratio(%) 계산 결과는 〈Fig. 3〉과 같다. 면 직물을 제외하고 전체적으로 몰리브덴 스퍼터링 처리 후 무게가 3.3~26.7mg 정도 증가하였다. 면직물만 무게가 100mg 감소한 것은 스퍼터링 처리 중 플라즈마가 시료 표면에 에칭 효과를 주어 면 섬유 표면이 깎인 것으로 사료된다. 이에 따라 면 직물의 스퍼터링 처리 후 Add-on ratio 값도 마이너스(-23.3%)를 나타내었다.

2. Electrical conductivity

몰리브덴 스퍼터링 처리 샘플의 표면 저항을 전기전도도 평가용 Digital multimeter로 측정한 결과, 몰리브덴 스퍼터링 나일론 필름은 저항값이 0Ω으로 나타나며, 높은 전기전도도를 나타냈다(Fig. 4). 그러나



(a)



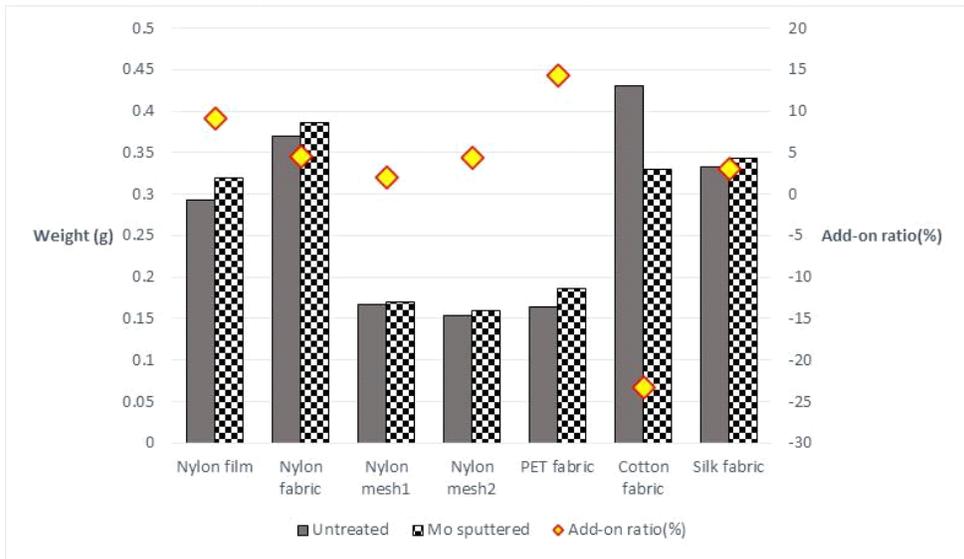
Element	Wt%	Mo L Series	C K Series	O K Series	Cu L Series
C	11.76				
O	8.94				
Cu	0.67				
Mo	78.63				
Total:	100				

(b)

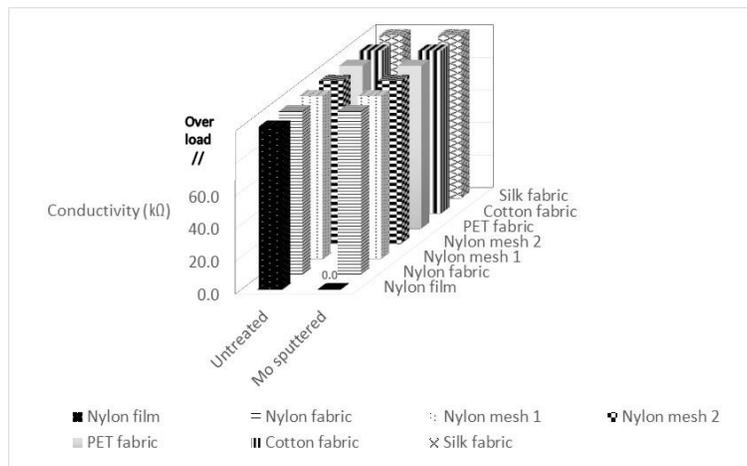
<Fig. 2> Surface characteristics of specimens
 (a) SEM images before and after molybdenum sputtering treatment
 (b) EDS data of molybdenum sputtered nylon film

폴리브덴 스퍼터링 처리 직물이나 미처리 소재의 경우, 모두 기계 측정 범위(over load) 이상의 저항 값을 보이며 전기전도성을 나타내지 않았다. 이는 폴리브덴 스퍼터링 두께가 직물 경위사의 이랑 높이보다 얇아서, 전류가 통하는 길이 중간에 절단되어 나타나는 현상으로 판단된다. 즉, 필름의 경우 이랑이 없이 플

랫(flat)한 표면이어서 폴리브덴 스퍼터링 처리시 얇게 필름위에 도포되더라도 굴곡이 없어 전류가 잘 통하는데, 직물의 경우 경위사 교차점 등의 부근에서 스퍼터링 층이 절단되어 전류가 통하지 않는 것으로 사료된다. 따라서 폴리브덴 스퍼터링 처리 직물이 전기전도성 소재로 활용되기 위해서는 경위사 이랑을 충



<Fig. 3> Changes in weight and Add-on untreated and Mo sputtered samples



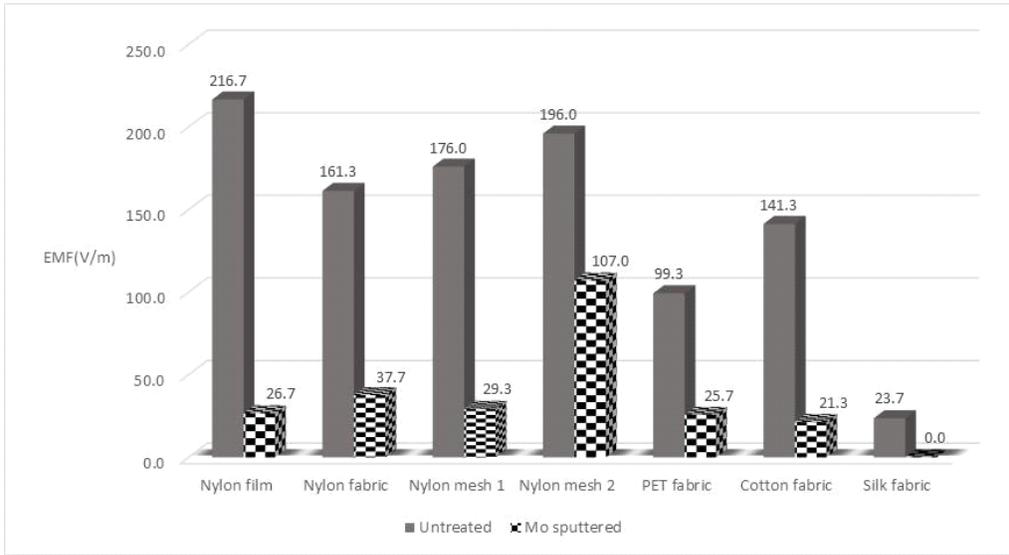
<Fig. 4> Electrical conductivity of untreated and Mo sputtered samples

분히 덮을 만큼의 두께로 스퍼터링 처리를 실시해야 전기전도성이 발현될 것으로 사료된다.

3. Blocking of electromagnetic waves

전자파 차폐 효과를 측정할 결과, 몰리브덴 스퍼터링 시료를 전자파원 앞에 놓았을 때 전자파장(EMF) 값이 크게 감소했다(Fig. 5). 본 연구에서 사용된 시료 중 EMF 값이 가장 낮은 시료는 스퍼터링 처리된 실크 원단으로 EMF 값은 0V/m였다. 실크 원단의 경우,

미치리인 상태도 우수한 전자파 차단 특성(23.7V/m)을 나타내었다. 전자파원 앞의 샘플로 전자파 차폐 효과를 측정할 때, 미치리 샘플의 경우 EMF 값이 2-121 V/m 감소했지만 스퍼터링 처리된 샘플의 경우 23.7~190.0V/m 감소했다. 스퍼터링 처리 후 가장 전자파 차단 효과가 낮았던 시료는 Nylon mesh 2로, 이는 직물 사이 기공 크기가 크기 때문으로 판단된다. Nylon 필름, Nylon mesh1, Nylon mesh 2를 비교해 보았을 때, 같은 나일론이어도, 스퍼터링 처리 후 EMF 값의 변



<Fig. 5> Blocking of electromagnetic waves

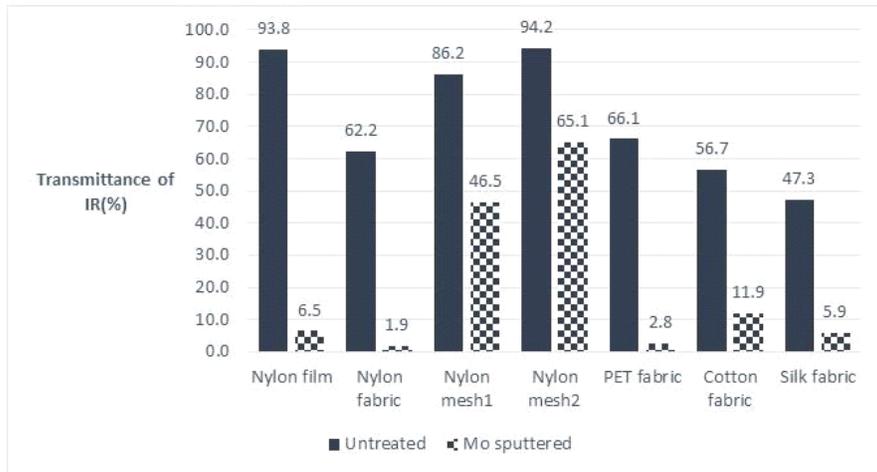
화는 기공 사이즈가 증가함에 따라 EMF 값이 증가하였다. 나일론 필름은 기공이 없는데, 폴리브렌 스퍼터링 처리 후 EMF 값이 26.7V/m이 나타났고, 스퍼터링 처리된 Nylon mesh1은 29.3V/m, 기공크기가 Nylon mesh 1보다 큰 스퍼터링 처리된 Nylon mesh 2는 107.0V/m을 나타내었다.

4. Transmittance of IR(%)

미처리 시료, 폴리브렌 스퍼터링 처리 시료의 적외

선 투과 특성 결과는 <Fig. 6>과 같다. 미처리 시료의 IR 투과율은 시료 모두 47.3~94.2%로 나타났으나, 폴리브렌 스퍼터링 처리를 행하였을 때에는 투과율이 1.9~65.1%로 현저하게 감소하였다. 이는 폴리브렌 스퍼터링 층이 IR 투과를 차단한 것으로 판단된다.

IR 투과도 실험시, 한쪽 면만 스퍼터링한 경우 스퍼터링 층의 방향은 IR 투과율에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 이는 적외선 열화상 카메라로 촬영과 IR 투과율이 반드시 동일한 경향성을 보이지 않는



<Fig. 6> Transmittance of IR according to the samples

다는 것을 반증해준다(H. R. Han, 2019).

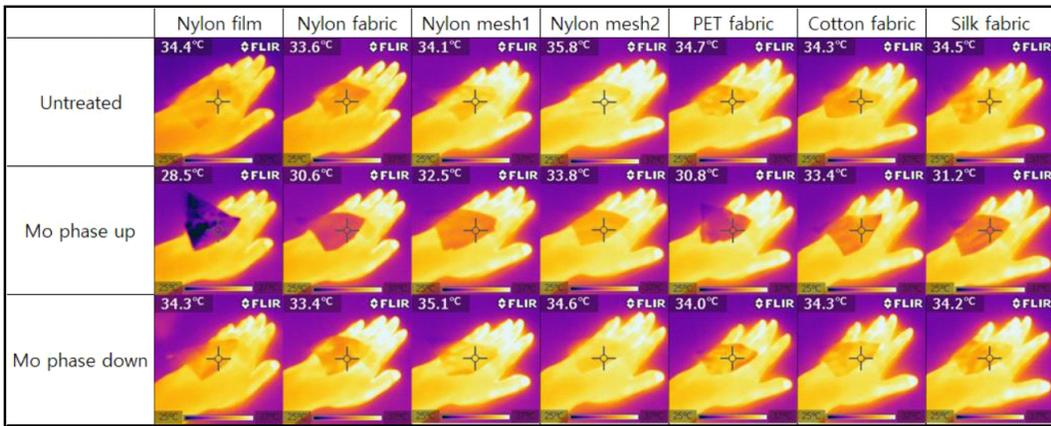
5. Infrared thermographic camera stealth function based on heat transfer

Base fabric 시료의 종류, 스퍼터링 방향에 따른 적외선 열화상 카메라 이미지는 대기 온도 20℃, 습도 24%에서 실시하였다. 시료와 손이 밀착되어 있을 때, 적외선 열화상 카메라 촬영 이미지는 <Fig. 7>과 같다.

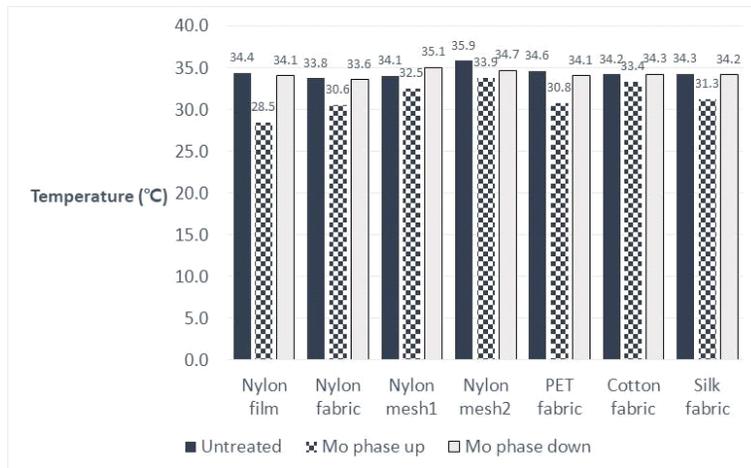
몰리브덴 스퍼터링 층 면이 인체(손등)를 향할 때에는 표면온도가 손에 가까운 온도를 보였다. 그러므로 몰리브덴 스퍼터링 층이 손등을 향할 때에는 스텔스 효과가 보이지 않는다. 한 쪽 면만 몰리브덴 스퍼터링 처리 한 7종류 시료 모두 몰리브덴 층이 외기를

향할 때, 주변과 손위에 시료가 있는 부분의 색상이 유사하게 나타나면서 손이 은닉되어 보이는 효과를 보였다. 선행연구에서 외기 20℃인 상황에서 1,000W로 22.5분 동안 알루미늄 스퍼터링한 시료를 이용하여 적외선 열화상 촬영하였을 때에, 금속 층이 외기를 향할 때, base 시료 종류(nylon, cotton, silk, PET, nylon belended wool, laminated PET fabric)에 따라 표면 색상이 다르게 나타났다(H. R. Han, 2019).

본 연구에서도 선행연구와 마찬가지로 base fabric 종류에 따라 약간 다른 표면 온도를 보였다. 선행연구처럼 본 연구에서도 필라멘트 섬유를 사용한 직물(nylon, PET, silk)이 스테이플 섬유(cotton)를 사용한 직물보다 다소 낮은 표면온도를 보였다(Fig. 8). 이는



<Fig. 7> IR thermal imaging for different base samples



<Fig. 8> Surface temperature for different base samples (Distance between hand and sample: 0mm)

섬유가 매끈할수록 몰리브덴 스퍼터링 층이 균일하게 도포되어, 열전달이 더욱 빠르고 효율적으로 이루어져서, 스텔스효과가 좋은 것으로 판단된다(H. R. Han, 2019).

또한 몰리브덴 스퍼터링 처리된 나일론 시료의 경우, 스퍼터링 층이 외기를 향할 때 film> fabric> mesh1> mesh2 순서로 표면온도가 낮게 나타났다. 나일론 필름이 가장 낮은 온도를 나타낸 이유는 기공이 없기 때문에 몰리브덴 층이 직물이나 mesh보다 촘촘하게 스퍼터링되어서 열 전달이 더욱 우수한 것으로 사료된다.

앞에서 실시한 적외선 열화상 이미지를 토대로 정량적인 색상 변화를 관찰하기 위해 Image J 프로그램과 Colorinspector 3D를 활용하여 Lab 값을 측정해 보았고(Table 3), ΔL , Δa , Δb , ΔE 값을 계산하였다(Table 4). 그리고 외기의 L, a, b 값은 각각 L: 29, a: 56, b: -56으로 나타났다.

그 결과, 미처리 직물과 Mo phase down 직물의 경우 L, a, b 값이 비교적 유사하게 나타났다. 이는 <Table 4>의 ΔL , Δa , Δb , ΔE 를 보면 확인할 수 있다. Mo phase down의 ΔL , Δa , Δb , ΔE 절대값이 Mo phase up보다 훨씬 작게 나타나는 것을 알 수 있

어서, 미처리 시료와의 차이가 적은 것을 나타내 주었다. 또한 Mo phase up의 경우, ΔE 값이 10.6~109.3으로 높게 나타나 은닉 효과가 Mo phase down보다 큰 것으로 나타났다. 그리고 합성섬유 직물의 ΔE 값(101.8, 63.3)은 천연섬유(42.1, 10.6)의 ΔE 값보다 더 커서 은닉 효과가 더 우수한 것으로 나타났다.

그에 비해 몰리브덴 층이 외기를 향할 때에는 미처리 직물에 비해 명도를 나타내는 L값이 73~3 정도 더 낮게 나타나는 것으로 관찰되었다. 이는 시료의 표면 온도가 낮아 상대적으로 밝기가 낮게 나타나는 것으로 사료된다. 또한 빨강~녹색 정도를 나타내는 a 값의 경우 몰리브덴 층이 외기를 향할 경우 값이 대체적으로 더 높게 나왔다.

6. Water contact angle

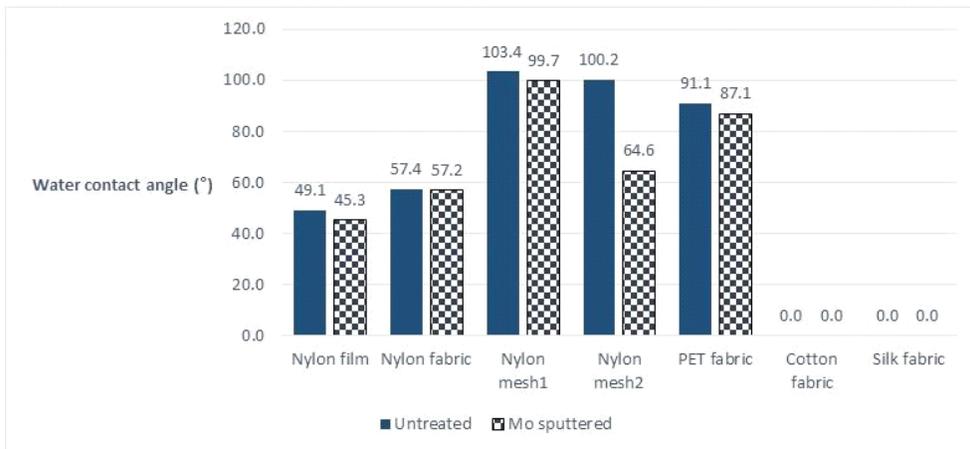
몰리브덴 스퍼터링 처리 시료의 접촉각을 살펴본 결과는 <Fig. 9>와 같다. 그 결과, 대체적으로 Nylon mesh2를 제외하고 몰리브덴 스퍼터링 처리로 인해 접촉각이 아주 작게 4.1~0.2° 정도 감소하며 큰 차이를 보이지 않았다. <Table 1>에서 볼 수 있듯이, Nylon mesh2는 다른 시료들에 비해 워낙 실과 실 사이 기공 면적이 넓어서 몰리브덴 스퍼터링 처리 시 물방울이

<Table 3> L, a, b value of untreated and Mo sputtered samples

	Untreated			Mo phase up			Mo phase down		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
Nylon film	82	3	73	9	-4	-8	75	20	77
Nylon fabric	69	33	73	53	60	18	78	14	79
Nylon mesh1	76	17	78	66	38	67	85	-1	75
Nylon mesh2	87	-5	62	71	19	71	79	10	78
PET fabric	81	10	78	47	63	-2	80	11	77
Cotton fabric	71	27	73	68	37	71	82	9	77
Silk fabric	76	11	75	59	45	57	82	6	78

<Table 4> ΔL , Δa , Δb , ΔE values from IR thermal imaging

Mo layer direction and ΔL , Δa , Δb	Mo phase up				Mo phase down			
	ΔL	Δa	Δb	ΔE	ΔL	Δa	Δb	ΔE
Nylon film	-73	-7	-81	109.3	-7	17	4	18.8
Nylon fabric	-16	27	-55	63.3	9	-19	6	21.9
Nylon mesh1	-10	21	-11	25.7	9	-18	-3	20.3
Nylon mesh2	-16	24	9	30.2	-8	15	16	23.3
PET fabric	-34	53	-80	101.8	-1	1	-1	1.7
Cotton fabric	-3	10	-2	10.6	11	-18	4	21.5
Silk fabric	-17	34	-18	42.1	6	-5	3	8.4



<Fig. 9> Water contact angle of untreated and Mo sputtered samples

빠르게 미끄러져 빈 공간으로 이동하여 접촉각이 현저하게 감소하는 것으로 판단된다. 면과 실크의 경우, 처리 전후 모두 동일하게 0으로 흡수율이 좋게 나타났다. 이는 몰리브덴 스퍼터링 층이 워낙 얇아서 직물의 경위사 이랑 틈을 메우지 않아 그 틈으로 물이 스미는 것으로 추측된다. 또한 몰리브덴 층으로 오히려 수분이 빠르게 이동하는 것으로 판단된다.

IV. Conclusions

본 연구에서는 몰리브덴 스퍼터링 처리 직물의 표

면 특성, 전기전도성, 전자파 차단특성, IR 투과 특성, 적외선 열화상 카메라에 대한 스텔스 기능, 열적 특성, 수분특성 등을 연구하였다. 몰리브덴 스퍼터링을 위한 base fabric으로 Nylon film, Nylon fabric, Nylon mesh1, Nylon mesh2, PET fabric, Cotton fabric, Silk fabric을 선택한 후 몰리브덴 스퍼터링 처리하여 적외선 열화상 카메라 촬영, 색차, 온도 변화 등을 연구하고, 적외선 투과 특성과의 연관성을 고찰하였다.

SEM 촬영 결과, 몰리브덴 스퍼터링 처리 후 표면에 몰리브덴 나노 그래인이 형성된 것을 확인할 수 있었다. 또한 EDS 결과, 몰리브덴이 78.63Wt% 검출되었

다. 이 외에는 C(11.76Wt%), O(8.94Wt%) 등이 검출되었는데, 이는 EDS 사용시 빔이 몰리브덴 층을 뚫고 지나가 나일론 층까지 검출했기 때문으로 사료된다.

전기전도성을 측정한 결과, 몰리브덴 스퍼터링 나일론 필름은 0Ω 표면 저항과 높은 전기 전도도를 보였다. 그러나 몰리브덴 스퍼터링 직물은 전기 전도도가 낮았다. 이는 몰리브덴 스퍼터링이 직물 표면에 따라 교차부에서 계속되지 않아 전류가 흐르지 않기 때문으로 추정된다.

또한 전자파 차단 특성을 측정한 결과, 몰리브덴 스퍼터링 처리 결과, 모든 샘플의 전자파 차폐 특성이 눈에 띄게 증가했다. 전자기원 앞의 시료로 전자파 차폐 효과를 측정할 때, 미처리 시료의 경우 EMF 값이 2-121V/m 감소했지만 몰리브덴 스퍼터링 처리된 샘플의 경우 23.7~190.0V/m 정도 감소하였다. 몰리브덴 스퍼터링 처리 후 가장 전자파 차단 효과가 낮았던 시료는 Nylon mesh2로, 이는 직물 사이 기공 크기가 크기 때문으로 판단된다.

그리고 IR 투과 특성 실험 결과, 미처리 시료보다 몰리브덴 스퍼터링 처리 시료가 IR 투과율이 현저하게 감소하였으나, 몰리브덴 스퍼터링 처리 방향에 따른 IR 투과율 차이는 미미하였다.

적외선 열화상 카메라 촬영 결과, 인체 위에 단면 스퍼터링 직물을 놓았을 때, 스퍼터링 층이 외기를 향할 때 적외선 열화상 카메라로 관찰하면 주변과 유사한 색상을 보여 스텔스 효과를 나타내었다. Lab 측정 결과에서도 스퍼터링 층이 외기를 향할 경우 낮은 L 값을 보였고, a 값은 대체적으로 높게 나타내며 은닉 효과를 입증하였고, ΔE 값의 경우 10.6~109.3으로 높게 나타내어 미처리 시료와 큰 차이를 보였다. 그러나 단면 스퍼터링한 직물의 알루미늄 층이 손을 향하면, 손과 유사한 표면 온도를 보이며 스텔스 효과가 없었다. 그리고 합성섬유가 천연섬유보다 더 낮은 표면 온도를 보였는데, 이는 섬유가 필라멘트사이고 표면이 매끈할수록 몰리브덴 스퍼터링 층이 균일하여 열전달이 효율적이어서 낮은 표면온도로 나타나는 것으로 판단된다. 또한 몰리브덴 스퍼터링 처리된 나일론 시료의 경우, 몰리브덴 스퍼터링 층이 외기를 향할 때 film > fabric > mesh1 > mesh2 순서로 표면온도가 낮게 나타났다. 나일론 필름이 fabric이나 mesh보다 낮은 온도를 나타낸 이유는 기공이 없기 때문에 몰리브덴

층이 촘촘하게 스퍼터링되어서 열 전달이 더욱 우수한 것으로 판단된다.

위에서 언급한 IR 투과 특성과 적외선 열화상 카메라 결과를 살펴보았을 때, 몰리브덴 스퍼터링 방향은 적외선 투과율에 큰 영향을 미치지 않았다. 이는 적외선 열화상 카메라 이미지에 적외선 투과율이 영향을 미치지 않는다는 것을 반증해 주는 것으로 판단된다. 한편, 접촉각 실험 결과, 대체적으로 몰리브덴 스퍼터링 처리로 인해 표면 접촉각은 감소하는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 몰리브덴 스퍼터링 의류소재의 적외선 열화상 카메라에 대한 스텔스 효과를 적외선 투과 특성과 열전달 이론에 입각하여 연구하였고, 전자파 차단 성능, 전기전도성, IR 차단 특성, 수분 특성 등에 관하여 심도 있게 고찰하였다. 본 연구에서 제작한 직물의 우수한 스텔스 기능, 전자파 차단 특성, IR 차단 특성, 경량성 등으로 인해 군복, 고기능성 의복, smart wear, 전기전도성 메디컬 웨어 센서, 전자파 차폐 의류 등 다양한 분야에 활용 가능할 것으로 판단된다.

References

- ALCA technology. (2019, September 9). Magnetron sputtering [Blog Post]. Retrieved December 31, 2021, from <https://www.alcatechnology.com/en/blog/magnetron-sputtering/>
- Ashida, Y., Arashiba, K., Nakajima, K., & Nishibayashi, Y. (2019). Molybdenum-catalysed ammonia production with samarium diiodide and alcohols or water. *Nature*, 568, 536-540. doi:10.1038/s41586-019-1134-2
- Bae, K.-Y., Yang, Y.-S., & Choi, B.-H. (2013). Analysis of magnetic field distribution in a cylindrical-type magnetron sputtering system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 227(6), 881-889. doi:10.1177/0954405413477854
- Castro, I. A. d., Datta, R. S., Ou, J. Z., Castellanos-Gomez, A., Sriram, S., Daeneke, T., & Kalantar-zadeh, K. (2017). Molybdenum Oxides -From fundamentals to functionality. *Advanced Materials*,

- 29(40), 1-31. doi:10.1002/adma.201701619
- Chen, T., Yang, E. K., & Lee, Y. (2021). Development of virtual upcycling fashion design based on 3-dimensional digital clothing technology. *The Research Journal of the Costume Culture*, 29(3), 374-387. doi:10.29049/rjcc.2021.29.3.374
- Cheng, H., Ding, L.-X., Chen, G.-F., Zhang, L., Xue, J., & Wang, H. (2018). Molybdenum carbide nanodots enable efficient electrocatalytic nitrogen fixation under ambient conditions. *Advanced Materials*, 30(46), 1-7. doi:10.1002/adma.201803694
- Dehghan, K., Shi, Z., Woodrum, T. H., Brewer, S., & Sacks, R. (1994). Surface features of conductors eroded by sputtering in a magnetron glow discharge plasma. *Applied Spectroscopy*, 48(5), 553-560. doi:10.1366/0003702944924808
- Depla, D., Segers, S., Leroy, W., Hove, T. V., & Parys, M. V. (2011). Smart textiles: An explorative study of the use of magnetron sputter deposition. *Textile Research Journal*, 81(17), 1808-1817. doi:10.1177/0040517511411966
- Green, D. W., Gruen, D. M., Schreiner, F., & Lerner, J. L. (1974). Sputtering studies using the matrix isolation technique. *Applied Spectroscopy*, 28(1), 34-38. doi:10.1366/000370274774332849
- Habekost, M. (2013). Which color differencing equation should be used? *International Circular of Graphic Education and Research*, 6, 20-33.
- Han, H. (2019). Influencing factors on purchase intention for smart healthcare clothing by gender and age -Focused on TAM, clothing attributes, health-lifestyle, and fashion innovativeness-. *The Research Journal of the Costume Culture*, 27(6), 615-631. doi:10.29049/rjcc.2019.27.6.615
- Han, H. R. (2019). Characteristics of infrared blocking, stealth and color difference of aluminum sputtered fabrics. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 43(4), 592-604. doi:10.5850/JKSCT.2019.43.4.592
- Han, H. R. (2021). Electrical and thermal properties of molybdenum sputtering material. *Proceeding of the 2021 Costume Culture Association fall Conference Convergence of Costume & Culture*, 84.
- Han, L., Liu, X., Chen, J., Lin, R., Liu, H., Lü, F., . . . Xin, H. L. (2018). Atomically dispersed molybdenum catalysts for efficient ambient nitrogen fixation. *Angewandte Chemie*, 131(8), 2343-2347. doi:10.1002/ange.201811728
- Hao, X., Zhao, Q., Su, S., Zhang, S., Ma, J., Shen, L., . . . He, Y.-B. (2019). Constructing multifunctional interphase between $\text{Li}_{1.4}\text{Al}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}(\text{PO}_4)_3$ and Li metal by magnetron sputtering for highly stable solid-state lithium metal batteries. *Advanced Energy Materials*, 9(34), 1-8. doi:10.1002/aenm.201901604
- He, S., Chen, Z., Xin, B., Zhang, F., Wang, X., Liu, Y., . . . Yang, Y. (2019). Surface functionalization of Ag/polypyrrole-coated cotton fabric by *in situ* polymerization and magnetron sputtering. *Textile Research Journal*, 89(23-24), 4884-4895. doi:10.1177/0040517519842801
- Hou, C., Wang, J., Du, W., Wang, J., Du, Y., Liu, C., . . . Guo, Z. (2019). One-pot synthesized molybdenum dioxide-molybdenum carbide heterostructures coupled with 3D holey carbon nanosheets for highly efficient and ultrastable cycling lithium-ion storage. *Journal of Materials Chemistry A*, 7(22), 13460-13472. doi:10.1039/C9TA03551F
- Hua, W., Sun, H.-H., Xu, F., & Wang, J.-G. (2020). A review and perspective on molybdenum-based electrocatalysts for hydrogen evolution reaction. *Rare Metals*, 39(4), 335-351. doi:10.1007/s12598-020-01384-7
- Im, H., & Ko, H. Z. (2017). The analysis of the characteristic types of motion recognition smart clothing products. *The Research Journal of the Costume Culture*, 25(4), 529-542. doi:10.7741/rjcc.2017.25.4.529
- Jeong, D., Lee, S., Kwon, C.-R., Park, I., Heo, S., &

- Kim, D.-E. (2018). Design and development of fabric-type fitness band. *The Research Journal of the Costume Culture*, 26(4), 632-648. doi:10.29049/rjcc.2018.26.4.632
- Jones, A. H. S., Camino, D., Teer, D. G., & Jiang, J. (1998). Novel high wear resistant diamond-like carbon coatings deposited by magnetron sputtering of carbon targets. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 212(4), 301-306. doi:10.1243/1350650981542119
- Kang, J., & Kwon, G. (2021). A study on the expression types and internal meanings of ecology images appeared in modern digital fashion. *The Research Journal of the Costume Culture*, 29(3), 422-436. doi:10.29049/rjcc.2021.29.3.422
- Lai, H.-C., Tsai, H.-H., Hung, K.-Y., & Feng, H.-P. (2014). Fabrication of hydroxyapatite targets in radio frequency sputtering for surface modification of titanium dental implants. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 26(9), 1050-1058. doi:10.1177/1045389X14530593
- Ma, L., Wu, R., Miao, H., Fan, X., Kong, L., Patil, A., . . . Wang, J. (2020). All-in-one fibrous capacitive humidity sensor for human breath monitoring. *Textile Research Journal*, 91(3-4), 398-405. doi:10.1177/0040517520944495
- Mao, Z., Wang, W., Liu, Y., Zhang, L., Xu, H., & Zhong, Y. (2014). Infrared stealth property based on semiconductor (M)-to-metallic (R) phase transition characteristics of W-doped VO₂ thin films coated on cotton fabrics. *Thin Solid Films*, 558(2), 208-214. doi:10.1016/j.tsf.2014.02.055
- Pastel, K. H., & Rawal, S. K. (2016). Exploration of wettability and optical aspects of ZnO nano thin films synthesized by radio frequency magnetron sputtering. *Nanomaterials and Nanotechnology*, 6(22), 1-7. doi:10.5772/62804
- Qi, H., Sui, K., Ma, Z., Wang, D., Sun, X., & Lu, J. (2002). Polymeric fluorocarbon-coated polyester substrates for waterproof breathable fabrics. *Textile Research Journal*, 72(2), 93-97. doi:10.1177/004051750207200201
- Rana, M. S., Hu, C. X., Shaaban, M., Imran, M., Afzal, J., Moussa, M. G., . . . Sun, X. (2020). Soil phosphorus transformation characteristics in response to molybdenum supply in leguminous crops. *Journal of Environmental Management*, 268(15), 1-11. doi:10.1016/j.jenvman.2020.110610
- Raza, J., Mebarek-Oudina, F., & Chamkha, A. J. (2019). Magnetohydrodynamic flow of molybdenum disulfide nanofluid in a channel with shape effects. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 15(4), 737-757. doi:10.1108/MMMS-07-2018-0133
- Sangwan, V. K., Lee, H. S., Bergeron, H., Balla, I., Beck, M. E., Chen, K. S., & Hersam, M. C. (2018). Multi-terminal memtransistors from polycrystalline monolayer molybdenum disulfide. *Nature*, 554, 500-504. doi:10.1038/nature25747
- Shahidi, S., & Ghoranneviss, M. (2015). Plasma sputtering for fabrication of antibacterial and ultraviolet protective fabric. *Clothing and Textiles Research Journal*, 34(1), 37-47. doi:10.1177/0887302X15594455
- Shi, Z., Woodrum, T. H., Dehghan, K., Brewer, S., & Sacks, R. (1992). Sputtering behavior of a magnetron glow discharge device. *Applied Spectroscopy*, 46(5), 749-757. doi:10.1366/0003702924124709
- Su, C. I., Peng, C. C., & Lee, C. Y. (2010). Performance of viscose rayon based activated carbon fabric modified by sputtering silver and continuous plasma treatment. *Textile Research Journal*, 81(7), 730-737. doi:10.1177/0040517510388546
- Wu, R., Ma, L., Patil, A. B., Hou, C., Meng, Z., Zhang, Y., . . . Yu, W. (2019). A facile method to prepare a wearable pressure sensor based on fabric electrodes for human motion monitoring. *Textile Research Journal*, 89(23-24), 5144-5152. doi:10.1177/0040517519849451
- Yuan, X., Wei, Q., Chen, D., & Xu, W. (2015).

Electrical and optical properties of polyester fabric coated with Ag/TiO₂ composite films by magnetron sputtering. *Textile Research Journal*, 86(8), 887-894. doi:10.1177/0040517515595034
Zang, Y., Niu, S., Wu, Y., Zheng, X., Cai, J., Ye, J.,

. . . Qian, Y. (2019). Tuning orbital orientation endows molybdenum disulfide with exceptional alkaline hydrogen evolution capability. *Nature Communications*, 10(1), 1-8. doi:10.1038/s41467-019-09210-0