

3 전자섬유기반 웨어러블 전자소자의 연구동향 및 기술

글_손선영 교수 | 상지대학교 반도체 · 에너지공학과

1. 서론

웨어러블 전자(wearable electronics) 시장이 활성화되면서 대학, 연구소, 의류 기업들을 중심으로 전자섬유(electronic fiber), 전자직물(electronic textile) 및 스마트 섬유(smart textile)에 관한 핵심기술 개발 및 관련 개발은 다양한 응용분야로 확대되고 있다 [1]. 초기 웨어러블 전자 소자에 대한 개발로는 2007년 리바이스에서 애플의 아이팟을 보관 및 연결 그리고 컨트롤 장치들을 청바지에 유선으로 연결한 제품이 독일 Fraunhofer IZM 연구소에서는 딱딱한 전자 부품들을 직물에 재봉하여 집적화하는 방식으로 시도되었다. 이후 2016년 미국은 섬유 반도체를 비롯한 텍스트로닉스 원천기술 개발을 추진하는 협회를 설립함으로써

전자 섬유 관련한 개발에 집중하였다. 유럽에서는 미아 방지용 아동복, 영유아의 돌연사 방지를 위한 생체신호 모니터링, 유방암 진단을 위한 속옷 등을 개발하였으며, 일본에서는 노령자 및 장애인의 보행을 보조하기 위한 타이즈 등 다양한 전자섬유 기반한 제품들을 개발하고있다. 최근 전자 섬유기반 웨어러블 전자 소자에 대한 개발은 온열 요법, 생체신호 모니터링, 스포츠 트레이닝에 기반 데이터 수집, 군인의 위치 및 건강상태 체크 및 트럭 운전사의 피로도에 따른 모니터링과 같은 의료용, 야외활동, 군사용 등 다양한 산업분야에 적용하기 위한 연구들이 활발하게 진행되고 있다 [2,3]. 현재까지 실제 의복처럼 착용할 수 있는

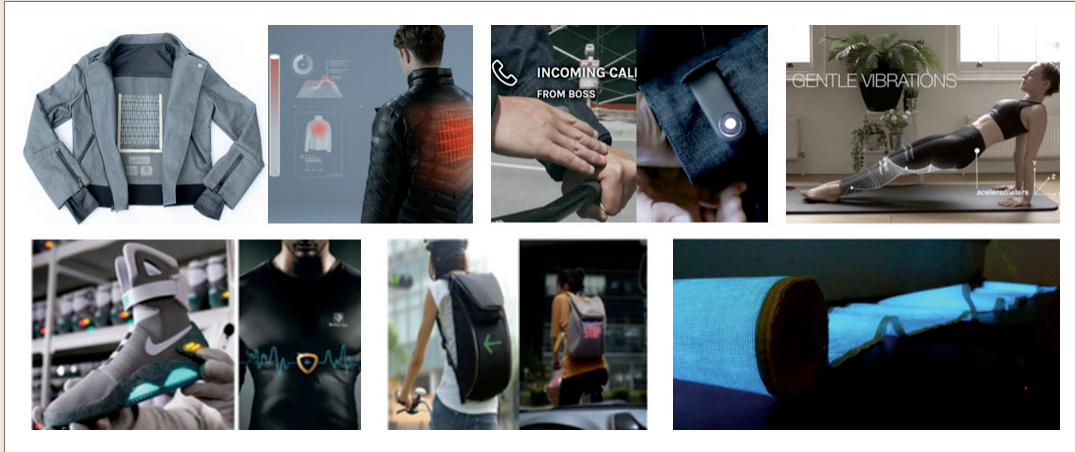


그림 1 ▶ Wearable e-textiles applications. (Butler Technologies, Black Yak, Levi's, Wearable X, Nike, SEIL bag, Fudan University)

스마트 의류용 전자 섬유에 대한 개발은 스포츠 레저용 전도성 섬유 개발이 주를 이루고 있으며 해외기업들과 대학 및 연구소들이 협업을 통해 다양한 제품들을 선보이고 있다. 섬유와 IT 제품이 융합된 형태로는 손가락 굽힘에 따라 전기적 신호 변화를 음성으로 구현하는 스마트 글러브 및 직물형 터치스크린 입력 인터페이스를 구현한 의류 등이 있다. 그림 1은 현재 생산 및 개발중인 다양한 웨어러블 전자 직물의 응용 제품들을 소개하였다.

본 기고에서는 전자 섬유용 전도성 소재 및 보호막에 대해 소개하고, 전자 섬유를 기반으로 개발된 웨어러블 바이오센서, 태양전지 및 에너지발전소자, 디스플레이 및 광원들에 대한 연구 동향들을 소개하고자 한다.

2. 전자 섬유(e-textile)의 연구동향

2.1 전도성 소재

기존 디스플레이 및 전자소자에서 광범위하게 사용되고 있는 indium tin oxide (ITO) 투명전극은 폴더블 및 구부림과 같은 물리적 자극에 특성이 저하되어 웨어러블 전자소자에 적용하기에 제한적이다. 따라서 전자 섬유용 전도성 소재로 graphene, carbon nanotube (CNT), multiwalled CNT (MWCNT)와 같은 탄소 동소체(carbon allotropes)들과 폴리머 복합 재료가 용액 방사된 전도성 복합 섬유, CNT/Ag 나노벨트 하이브리드 섬유 등이 개발중이다 [4,5]. 기능성 고분자를 이용한 전도성 소재로는 poly (3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonic acid) (PEDOT:PSS), polyaniline (PANI), polypyrrole (PPY), 전도성 하이드로젤 등이 주를 이룬다. 그 외 Ag,

Cu, Ni과 같은 금속 물질 기반 나노 와이어 및 마이크로 와이어에 대한 연구들이 진행되고 있다 [2]. 전도성 소재를 이용해 섬유에 적용한 연구 결과로 미국 NCSU대학의 Jesse S. Jur 교수 연구팀이 전도성 잉크 생산기업과 협업해 니트 의류에 고전도성 잉크를 프린팅하고 그 위에 폴리우레탄 필름을 적층하여 직물의 견고성을 향상시켰다 [6,7]. 맨체스터 대학의 연구진들은 직물 위에 전도성이 높은 graphene-Ag 나노입자 기반 복합 잉크를 잉크젯 프린팅한 결과를 발표하였다 [4]. 잉크젯 프린팅 공정은 원하는 부분에만 선택적으로 코팅이 가능하므로 재료 소모가 적고, 빠른 시간으로 디지털 방식의 적층이 가능하여 최근 전도성 섬유 코팅에 주로 이용되고 있다. 국내 제일 모직은 압력센서와 전도성 섬유를 이용하여 회로를 구현하였고, 한화첨단소재는 웨어러블 디바이스용 플렉서블 기관용 링크트론(LinkTron)을 개발하였다.

2.2 발수성 보호막

제작된 스마트 의류를 실제 의복처럼 착용하기 위해서는 손세탁 또는 기계 세탁이 가능해야 하며, 통기성(breathable)과 물에 대한 저항성을 갖는 방수성(waterproof)을 갖는 보호막 적용이 요구되고 있다 [8]. 기존 디스플레이의 수분투습방지 및 보호막으로 많이 사용되는 공정으로 원자층 화학기상 증착법(atomic layer chemical vapor deposition, ALCVD)을 이용한 산화막은 직물 위에 Al_2O_3 /silane-based film을 적층한 보호막이 약 10^{-6}

$g/m^2/day$ 의 매우 낮은 수분투습율(water vapor transmission rate, WVTR)을 나타내며, 3 cm 반경 구부림 테스트에서 수분투습율이 크게 감소하지 않음이 확인되었다 [9]. 또한 발수성 소재로 테프론((polytetrafluoroethylene, PTFE)), 폴리우레탄(polyurethane, PU), 폴리비닐알콜(polyvinyl alcohol, PVA)을 이용해 스프레이, 스핀코팅, 담금(dipping)과 같은 다양한 공정 방법으로 적용되고 있다 [8]. 2019년 KIST에서는 유기반도체와 절연체 고분자의 혼합물을 전도성 실 표면에 용액공정으로 코팅하여, 혼합물의 자발적인 상분리 현상을 이용해 절연막/반도체 이중층으로 감싸진 전도성 섬유 구조체에 대한 연구를 보고하였다.

2.3 바이오센서기반 전자섬유

웨어러블 기술이 주목된 전자 직물 개발에 대해 신체 중심 감지 및 무선 통신 시스템에서 유연하면서도 전도성을 갖는 전자 섬유는 다양한 바이오센서 및 안테나에 적용되고 있다 [10]. 전도성 소재를 이용한 웨어러블 생체전위 모니터링의 경우 피부와 전극 접촉에 의한 임피던스, 노이즈 내성(noise immunity) 및 모션 아티팩트(motion artifact)에 대한 민감도 및 안정성 등이 포함되며, 이를 기반으로 개발된 전도성 전자섬유는 심전도(electrocardiography, ECG), 뇌파검사(electroencephalography, EEG), 근전도(electromyography, EMG), 눈동자의 움직임에 따른 안전도 신호(electrooculography, EOG) 분석을 위한 웨어러블 전자로 개발되고

있다 [11,12]. 기업들을 중심으로 개발중인 바이오센서 제품들을 살펴보면, 2015년 미국 센소리아(Sensoria)는 심장박동 감지기를 부착한 스마트 의류를 개발하여 운동상태 모니터링 및 심장마비 증상시 스마트폰 연동을 통해 의료진 및 가족에게 위치정보를 전달하는 제품을 개발하였다. 미국 사이렌(Siren)은 세계 최초로 온도변화 모니터링이 가능한 마이크로 센서를 양말에 장착한 신경 의류(neurofabric) 제품을 개발함으로써 당뇨병성 족부 궤양 발생의 예방이 가능한 제품을 내놓았다. 덴마크의 오마텍스(Ohmatex)는 전도성 실을 사용해 시니어의 하지부종 예방 스타킹을 개발하였다. Wearable X의 NadiX는 요가 운동을 모니터링하고 햅틱 진동으로 자세를 교정해주는 요가 바지를 판매중이다.

2017년 리바이스는 구글의 스마트폰과 연계된 의류를 만드는 플랫폼과 리바이스의 데님 원단이 결합된 스마트 의류를 선보였다. 이후

프로젝트 자카드 실제품을 런칭하여 백팩 및 대화형 재킷(communication jacket)을 개발 및 스마트 태그가 업데이트되고 옷을 입으라는 화면이 표시 및 재킷의 기능을 설명하는 화면이 표시, 제스처별로 휴대폰 기능을 할당할 수 있는 스마트 재킷을 선보였다. 아디다스(Adidas)는 듀폰(Dupont) 및 Invista와 공동으로 아디다스 웨어러블 스포츠 전자(Adidas Wearable Sports Electronics)를 설립하여 인체 착용형 생체 모니터링 통합 시스템 개발을 위한 기술들을 개발중에 있다. 필립스(Philips)는 RFID 모듈용 전자섬유기반 안테나 및 사람의 모션을 감지하는 스마트 카펫을 개발하였다. 국외대학들은 주로 기업과의 협업을 통해 전자직물기반 웨어러블 센서들을 개발중이며, 미국 NCSU대학은 Liquid X 사의 전도성 은(Ag)을 잉크젯 프린팅 방식으로 코팅하여 헬스케어용 압력센서에 적용하였다 [13]. MIT대학은 빛, 소리, 열 등을 감지할 수 있는

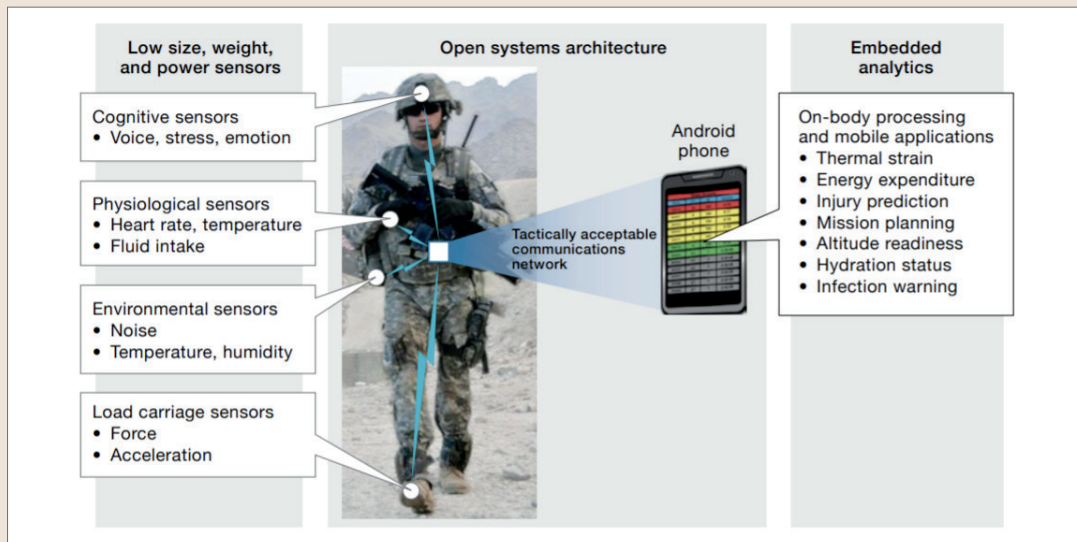


그림 2 ▶ The components of biomedical sensors for military's application [14].

광 섬유 센서(optical fiber sensor)기반 부상 군인들의 체열 변화로 감지되는 신호 및 전장에서 목소리 등을 인식하는 시스템을 구상하였다. 국내에서는 코오롱인더스트리에서 사람의 체온에 따라 온도가 조절되는 발열성 스마트 섬유인 HeaTex, 캠핑용 텐트, 발열 조끼 등과 같은 기능성 스마트의류를 개발하였다.

전자직물기반 웨어러블 바이오센서에 대한 개발은 다양한 응용제품으로 개발중이며, 더 나아가 그림 2에서와 같이 군사용 실제 전투복에 적용될 경우 일반 훈련 및 전투 상황과 같은 고온 및 고습의 열악한 환경에서도 고내구성을 요구할 뿐만아니라 통신모듈기반 다양한 데이터를 빠른 시간내에 처리해야 한다. 2020년 소개된 실시간 생리학적 상태 모니터(real-time physiological status monitor, RT-PSM)는 생체의학 센서로 가볍고, 소형이며, 전력(swap) 센서, 개방형 시스템 아키텍처, 임베디드 컴퓨터가 내장된 장치들로부터 전투원의 건강 및 성능에 대한 실시간 모니터링을 필요로 한다 [14].

2.4 태양전지 및 에너지 발전소자용 전자섬유

에너지 하베스팅(energy harvesting)을 위한 기존 에너지 발전시스템과 비교해 전자섬유기반 에너지발전소자는 경량이면서 플렉서블한 센서, 액추에이터, 전자소자를 포함한 자가구동이 가능한 차세대 나노발전기로 개발될 수 있을 것이다. 그러나 전자직물 위에 제작된 유기태양전지(organic photovoltaic, OPV)의 초기 연구결과들은 보호막이 적용

되거나 하이브리드 소자의 경우에도 기존 유리 및 플라스틱 기판위에 제작된 OPV와 비교해 상대적으로 매우 낮은 효율을 나타내었다 [15-17]. 2019년 유리섬유 직물위에 프린트된 모노리식 구조(monolithic-structured) 고체상태 염료감응 태양전지는 Ag전극과 투명 AgNW전극사이에 TiO₂ 컴팩트층, TiO₂/Dye/Spiro, PEDOT:PSS 의 5층으로 구성되며, 모든 기능성 소재들이 스크린 인쇄 및 스프레이 코팅과 같은 공정으로 직물 위에 직접 증착되었다 [18]. 2019년 폴리에스터 면직물 표면에 폴리우레탄(PU) 및 유리섬유 패브릭 위에 폴리이미드(polyimide, PI) 계면층을 적용해 표면거칠기를 감소함으로써 스크린 프린팅 기법으로 제작된 Iodine/Iodide (I₃⁻/I⁻) 액체 전해질 기반 스크린 프린팅된 태양전지는 각각 3.24%와 4.04%의 효율을 나타내었다 [19].

하지만 전자섬유 기반한 마찰전기를 이용한 나노발전기(triboelectric, TENG)의 본격적인 개발을 통해 에너지발전 소자용 전자직물에 대한 연구는 활발하게 이루어지고 있다. 2016년 가벼운 폴리머 섬유로 제작된 태양전지는 섬유기반 TENG와 함께 셔틀 플라잉 공정을 이용해 하이브리드 전력 섬유로 직조되었으며, 직조 패턴(무지 plain, 능직 twill, 새틴 satin)에 따른 전기출력을 테스트하였다. 제작된 하이브리드 전력 섬유조각에서 1분 만에 2 mF 및 2 V까지 충전되었으며, 이를 이용해 그림 3에서 보듯이 휴대폰 충전, 전자 시계에 전력이 공급되는 시연을 보여주었다 [20]. 싱가포르 난양공대 연구팀은 2018년

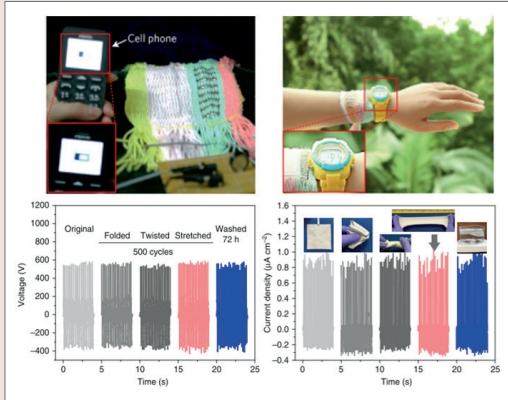


그림 3 ▶ (Top) Demonstration of the power textile to drive portable electronics [20]. (Bottom) Output voltages and current density of textile-TENG after various extreme deformations and washing [21].

Nature Communications에 신체 움직임의 기계적 에너지를 전력으로 변환하기 위해 그림 3의 세탁이 가능한 전자섬유기반 피부 접촉시 발생하는 마찰기반 TENG를 개발해 500회의 folded, twisted, stretched 및 72시간 물세척 (washed)후에 전압 및 전류 변화가 없는 직물형 TENG를 개발하였다 [21]. 2019년 Purdue 대학에서는 플루오르화 분자를 사용해 발유성 (omniphobic) 마찰전기 나노 발전기를 개발해 방수, 통기성, 항균성 자가발전 전자 섬유를 셔츠 목 부분에 오디오 전원 및 볼륨을 조절할 수 있는 인간과 기계의 인터페이스 역할을 하는 장치의 전력을 공급하는데 사용하였다 [22].

2.5 광원 및 디스플레이용 전자섬유

최근 LED 기반 광원이 피부 재생용 적색 및 근적외선, 비염 치료용 청색, 피부미용(기미 및 트러블 개선)을 위한 목적으로 광원의 파장에

다른 다양한 적용 분야들이 소개되고 있다. 하지만 LED의 경우 직진성이 강해 장시간 피부에 조사할 경우 저온 화상이 발생할 수 있으며, 기존 LED의 경우 다양한 곡면 형태의 인체 부위에 웨어러블 제품으로 적용하기에는 한계가 있어 유기발광소자(organic light emitting device, OLED)로 대체하려는 연구가 진행되고 있다. 전자섬유기반 빛이 나는 발광소자의 경우 디스플레이, 조명, 패션, 야간용 등 다양한 분야에 적용 가능하므로 활발한 연구가 이루어지고 있으나 직물의 거친 표면과 화학적 및 기계적인 내구성 등 아직은 해결해야 할 부분들이 많다. KAIST에서는 전자섬유기반 OLED를 실제 의류에 부착 및 2018년 분당서울대학교병원과 공동으로 OLED, 배터리, 과열방지 장치(heat sink)를 포함한 피부 재생용 광치료(photobiomodulation, PBM) 패치에 관한 연구결과를 보고하였으며, 최근 호환 가능한 OLED 픽셀 어레이 및 passive matrix로 작동될 수 있는 매트릭스 어드레스가 가능한 2차원 네트워크를 통해 수중에서도 안정적으로 작동하는 직물기반 OLED를 보고하였다 [23-25]. 특히, 2021년 포스텍에서는 롤투롤 스퍼터링 공정을 이용해 평탄층이 적용된 직물 위에 직접 ITO 전극을 증착하였으며, 최초로 노즐 프린팅 공정을 이용해 패턴이 가능한 전자직물기반 OLED를 개발하였다 [26].

디스플레이용 전자직물의 경우 CNT/Au 하이브리드 전극을 갖는 유기트랜지스터(organic thin film transistor, OTFT) 픽셀 회로와 OLED사이에 적층된 픽셀구조를 갖는 직물

기반 AMOLED 패널이 구동된 연구 결과를 얻었다 [27]. 2021년 Nature에 Shanghai's Fudan 대학은 최초로 길이가 6 m, 25 cm 폭의 대면적 직물기반 디스플레이를 제작하였다. 또한 2021년 블루투스, 마이크로 컨트롤러, 모듈을 통해 실시간 위치를 전송할 수 있는 융합직물 시스템 연구결과를 보고하였다 [28].

3. 맺음말

전자 기술과 섬유가 융합된 전자섬유 및 전자직물에 대한 연구는 활발하게 진행되고 있으나 대량생산 및 상업화 기준으로는 아직까지 개발할 부분들이 많이 남아있다. 웨어러블 기기는 액세서리, 의류 일체, 신체 부착형 등 다양한 형태로 제작돼 생활 전반에서 사용 가능하도록 개발되어야 할 것이다. 또한 실제 사람이 사용하려면 편안한 착용감을 갖도록 유연한 형태를 갖고 자유자재로 구부릴 수 있는 특성이 요구된다. 특히 군사용 의복에 적용하기 위해서는 더욱 가늘면서도 견고한 섬유 소재의 개발 뿐만아니라 수증 및 고온다습의 열악한 환경에서도 특성들을 유지함으로써 병사들의 안전을 책임질 수 있는 고성능 소재 및 제품 개발이 진행되어야 할 것이다. 본 기고에서는 전자섬유 기반한 소재 및 연구 개발된 제품들에 대한 최신 연구 동향을 파악하기 위해 대표적인 웨어러블 전자소자들에 대한 연구 결과들을 소개하였다.

현재까지 개발된 전자섬유 및 직물기반 웨어러블 제품들은 전도성 섬유 및 센서기반 전자섬유에 대한 연구가 주를 이루고있다. 향후 플렉서블 반도체, 배터리, 패키징 등 시스템적인 측면에서 신뢰성을 확보한다면 전자소자 일체형, 인체 삽입형 및 이식형과 같은 새로운 형태의 제품개발이 가능할 것으로 기대된다.

또한 전자 섬유의 개발은 차세대 전자통신 기술들이 접목됨에 따라 민간 및 공공 사회적인 부분으로 적용될 가능성이 크다. 예를 들어, 야간근무가 잦은 경찰, 경비원, 도로 위의 작업자들을 위한 보호복 및 긴급상황 알림 등의 안전모드 기능을 겸비한 의복 제품, 패션분야에는 시각적인 효과가 극대화된 융합제품으로 적용할 수 있을 것이다. 특히, 의료용으로 뇌파 신호를 나타내는 스마트 의류의 경우 언어 및 활동 장애가 있거나 거동이 불편한 고령자들의 상태를 모니터링하면서 동시에 의료진 및 가족들에게 위급 상황을 신속하게 전달할 수 있는 유용한 시스템으로 확대되어야 할 것이다. 📡

참 / 고 / 문 / 헌

- [1] M. Stoppa and A. Chiolerio, *Sensors (Switzerland)*, 14, 11957 (2014).
[doi: <https://doi.org/10.3390/s140711957>]
- [2] Y. Zhang, H. Wang, H. Lu, S. Li, and Y. Zhang, *iScience*, 24, 102716 (2021).
[doi: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102716>]
- [3] A. A. Simegnaw, B. Malengier, G. K. Rotich, M. G. Tadesse, and L. Van. Langenhove, *Materials*, 14, 5113 (2021).
[doi: <https://doi.org/10.20944/preprints202107.0388.v2>]
- [4] N. Karim, S. Afroj, S. Tan, K. S. Novoselov, and S. G. Yeates, *Sci. Rep.* 9, 1 (2019).
[doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44420-y>]
- [5] Y. E. Shin, J. Y. Cho, J. Yeom, H. Ko, and J. T. Han, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 13, 31051 (2021).
[doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.1c08175>]
- [6] H. Shahariar, H. Soewardiman, and J. S. Jur, *Conf. Proc. - IEEE SOUTHEASTCON* (2017) pp. 1-5.
[doi: <https://doi.org/10.1109/SECON.2017.7925306>]
- [7] I. Kim, H. Shahariar, W. F. Ingram, Y. Zhou, and J. S. Jur, *Adv. Funct. Mater.* 29, 1 (2019).
[doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.201807573>]
- [8] A. Mukhopadhyay and M. A. Vinay Kumar, *J. Ind. Text.*, 37, 225 (2008).
[doi: <https://doi.org/10.1177/1528083707082164>]
- [9] H. H. Kim, J. W. Shim, Y. J. You, Y. J. Lee, C. Park, D. K. Hwang, and W. K. Choi, *J. Mater. Chem. C*, 5, 1596 (2017).
[doi: <https://doi.org/10.1039/c6tc04310k>]
- [10] M. Krifa, *Textiles*, 1, 239 (2021).
[doi: <https://doi.org/10.3390/textiles1020012>]
- [11] M. A. Yokus, R. Foote, and J. S. Jur, *IEEE Sens. J.*, 16, 7967 (2016).
[doi: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2605071>]
- [12] G. Acar, O. Ozturk, A. J. Golparvar, T. A. Elboshra, K. Böhlinger, and M. Kaya Yapici, *Electron.*, 8, 1 (2019).
[doi: <https://doi.org/10.3390/electronics8050479>]
- [13] B. Ju, I. Kim, B. M. Li, C. G. Knowles, A. Mills, L. Grace, and J. S. Jur, *Adv. Healthc. Mater.* 2100893, 1 (2021).
[doi: <https://doi.org/10.1002/adhm.202100893>]
- [14] B. A. Telfer, K. Byrd, and P. P. Collins, *Lincoln Lab. J.*, 24 (2020).
- [15] Y. Fang, J. Tong, Q. Zhong, Q. Chen, J. Zhou, Q. Luo, Y. Zhou, Z. Wang, and B. Hu, *Nano Energy*, 16, 301 (2015).
[doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2015.06.029>]
- [16] S. Arumugam, Y. Li, S. Senthilarasu, R. Torah, A. L. Kanibolotsky, A. R. Inigo, P. J. Skabara, and S. P. Beeby, *J. Mater. Chem. A*, 4, 5561 (2016).
[doi: <https://doi.org/10.1039/c5ta03389f>]
- [17] Y. Li, S. Arumugam, C. Krishnan, M. D. B. Charlton, and S. P. Beeby, *Chemistry Select*, 4, 407 (2019).
[doi: <https://doi.org/10.1002/slct.201803929>]
- [18] J. Liu, Y. Li, S. Yong, S. Arumugam, and S. Beeby, *Sci. Rep.*, 9, 1 (2019).
[doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37590-8>]
- [19] J. Liu, Y. Li, M. Li, S. Arumugam, and S. P. Beeby, *IEEE J. Photovoltaics*, 9, 1020 (2019).
[doi: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2899432>]
- [20] J. Chen, Y. Huang, N. Zhang, H. Zou, R. Liu, C. Tao, X. Fan, and Z. L. Wang, *Nat. Energy*, 1, 1 (2016).
[doi: <https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.138>]
- [21] J. Xiong, P. Cui, X. Chen, J. Wang, K. Parida, M. F. Lin, and P. S. Lee, *Nat. Commun.*, 9, 1 (2018).
[doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06759-0>]

- [22] M. S. de Medeiros, D. Chanci, C. Moreno, D. Goswami, and R.V. Martinez, *Adv. Funct. Mater.*, **29**, 1904350 (2019).
[doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.201904350>]
- [23] S. Kwon, W. Kim, H. Kim, S. Choi, B. C. Park, S. H. Kang, and K. C. Choi, *Adv. Electron. Mater.*, **1**, 1500103 (2015).
[doi: <https://doi.org/10.1002/aelm.201500103>]
- [24] Y. Jeon, H. R. Choi, M. Lim, S. Choi, H. Kim, J. H. Kwon, K. C. Park, and K. C. Choi, *Adv. Mater. Technol.*, **3**, 1700391 (2018).
[doi: <https://doi.org/10.1002/admt.201700391>]
- [25] Y. J. Song, J. W. Kim, H. E. Cho, Y. H. Son, M. H. Lee, J. Lee, K. C. Choi, and S. M. Lee, *ACS Nano*, **14**, 1133 (2020).
[doi: <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b09005>]
- [26] S. Sohn, S. Kim, J. W. Shim, S. K. Jung, and S. Jung, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **13**, 28521 (2021).
[doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.1c02681>]
- [27] J. S. Kim and C. K. Song, *Materials*, **12**, 2000 (2019).
[doi: <https://doi.org/10.3390/ma12122000>]
- [28] X. Shi, Y. Zuo, P. Zhai, J. Shen, Y. Yang, Z. Gao, M. Liao, J. Wu, J. Wang, X. Xu, Q. Tong, B. Zhang, B. Wang, X. Sun, L. Zhang, Q. Pei, D. Jin, P. Chen, and H. Peng, *Nature*, **591**, 240 (2021).
[doi: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03295-8>]

저/자/약/력



성명	손 선영	
학력	2001년	대구가톨릭대학교 물리학과 이학학사
	2007년	성균관대학교 물리학과 이학박사
경력	2007년 ~ 2008년	한국기초과학지원연구원 박사후연구원
	2008년 ~ 2012년	대구가톨릭대학교 전자공학과 객원교수
	2014년 ~ 2015년	포항공과대학교 미래IT융합연구원 책임연구원
	2015년 ~ 2021년	포항공과대학교 IT융합공학과 연구부교수
	2021년 ~ 현재	상지대학교 반도체·에너지공학과 조교수