

# 스마트옷 - 전자옷 및 광전자옷<sup>1)</sup>

진 정 일 (한국과학문화교육단체이사장, 고려대학교 KU-KIST 융합대학원 석좌교수)

## 1. 들어가기 - 스마트 직물

스마트 직물(smart textiles)—자주 전자 직물(electronic textiles)이라고도 부름—은 주위(환경) 및 이용자와 상호 작용이 가능한 섬유제품을 광범위하게 부르는 명칭으로, 직물과 전자기술의 융합제품들이 그 대표적 예다. 보통 이들을 세 부류로 나눈다:

- ① 수동적 스마트 직물: 주로 센서를 통해 주위와 사용자를 감지함
- ② 능동적 스마트 직물: 센싱 기능과 작동기능을 함께 지님
- ③ 초 스마트 직물: 센싱, 반응, 작동 기능을 모두 지님

센서는 신호를 탐지하는 일종의 신경계로 볼 수 있으므로, 수동적 스마트 직물에 있어서 센서는 필수적이다. 작동장치는 탐지된 신호에 따라 자동적으로 또는 중앙 제어장치에 의해 작동되며, 센서와 함께 능동적 스마트 재료의 필수적 요소다.

직물에 기초한 센싱은 생의학 분야 및 안전 분야에서 중요한 연구 분야다. 직물 센서는 심전도(ECG, electrocardiogram), 근전도(筋電圖, EMG, electromyogram), 뇌파도(EEG, electroencephalogram) 센싱에 사용 가능하다.—열전대(thermocouple)를 천에 포함시켜 온도를 센싱 할 수 있으며, 발광 소자를 직물에 포함시키면 생물광학적(biophotonic) 센싱이 가능하다. 형상 민감(기억) 직물은 움직임을 감지하며,

EMG와 결합하면 근육 건강을 조사할 수 있다. 직물에 탄소 전극을 포함시켜 산소, 염분, 수분과 일부 공해 물질 등 환경과 생물의학 관련 정량을 행할 수 있다.

능동적 기능으로는 동력 생산과 저장, 인간과 인터페이스 소자, 라디오파(RF) 기능 등을 들 수 있다. 모든 전자장치는 동력을 필요로 하며, 이 점이 스마트 직물 개발의 설계상 주요한 도전이다. 동력 생산은 압전 소자와 광전자 소자 등을 통해 가능하다. 능동적 기계와 인간의 인터페이스는 대략 두 그룹으로 나눌 수 있다: 입력 소자와 표시(디스플레이) 소자가 그 둘이다. 입력소자로는 축전기 조각을 심어 운동(구부림), 압력, 잡아 늘이거나 압축 등을 기록하는 형상(모양)에 민감한 직물이나 누름단추 기능을 갖게 할 수 있다. 표시(디스플레이) 소자로는 직물 스피커(fabric speaker), 전발광 실(electroluminescent yarn), 유기발광 다이오드(organic light emitting diode(OLED)) 배열을 포함하도록 가공된 실 등을 들 수 있다. 또 천은 생체자기제어(bio-feedback) 효과를 공급하는, 또는 단순히 진동하는 요소를 지닐 수 있다. 간단한 천 안테나는 비전도성 천에 감춰 넣거나 짜 넣을 수 있는 일정 길이의 전도성 실이다.

스마트 직물 연구의 첫 단계는 스마트 소재의 탐색이며, 다음은 이런 소재를 어떻게 가공해서 스마트 직물을 얻는가에 있다. 스마트 직물은 의료, 체육, 예술, 국방 및 우주항공 등의 분야에 큰 도전을 던진다. 예컨대 의복에 센서, 에너지원, 가공, 통신 등을 집적(integration)시켜, 개인의 건강을 모니터링하는 일은 큰 관심사다.

1) 이 글의 내용 중 일부는 M. Stoppa와 A. Chiolerio의 글 (Wearable Electronics and Smart Textiles: A Critical Review, Sensors 2014, 14, 11957-11992)을 참조했다.

## 2. 스마트 직물 소재의 개발

• **전도성 섬유:** 금속 단섬유가 주를 이루며, 직물 직조시 함께 짜거나 뜨개질 세공을 통해 가공한다. 사용되는 금속은 구리, 구리/은, 구리/아연, 구리/아연/은, 알루미늄, 청동 및 강철 섬유 등이다. 스위스의 Elektrisola Feindraht사와 Swiss-Shield사가 이들을 시판하고 있다.

• **섬유의 코팅:** 직물 섬유를 금속, 금속염, 전도성 고분자 등으로 코팅한다. 은박막과 PEDOT:PSS(전도성 고분자) 코팅이 대표적 예다. 독일의 TITV는 나일론66를 은으로 코팅(비전도성  $1.2 \times 10^3 \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ )한 ELTEX를 개발했다.

• **전도성 직물:** 은, 구리, 구리/니켈 등 금속 실을 섬유 실에 꼬아 직조하든지, 금속섬유와 기초섬유를 뜨개질 세공한다. 영국의 Balex사는 Faratec이라는 제품(뜨개질 시공을 통해 금속섬유를 직물구조에 포함시킨다)을 시판하고 있으며, 가열성 용도와 전자폐 용도를 주 타겟으로 삼고 있다. 미국의 Thremshield사는 몇 가지 금속사와 직조한 나일론 천을 시판하고 있다. 또 전도성 패턴을 직물에 자수법으로 포함시켜 다양한 기능을 지니도록 하는 방법을 MIT 그룹이 제안한 바 있다.

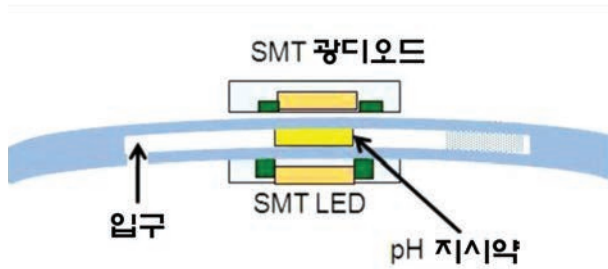
• **전도성 잉크:** 전도성 잉크는 주로 수성으로 은, 구리, 금 나노 입자 등으로 직물에 프린트해 목적하는 기능을 얻는다. 관심을 많이 받고 있는 잉크젯(inkjet) 프린팅은 유기 반도체 등 저점성도, 가용성 전도성 재료에 적합하다. 이 방법에서는 잉크가 작은 방울형태로 직물에 적용되므로 두께와 분산 균일성이 좋지 않다는 단점이 있다.

금속 나노입자 잉크를 잉크분사 프린팅한 후에는 신터링을 통해 나노입자들이 연속 접촉할 수 있도록 한다. 스크린 프린팅에서는 점성이 큰 페이스트를 사용하며, 두께가 큰 패턴을 얻는 데 적합하다. 최근에 영국 사우샘프턴(Southampton)대는 은 페이스트를 부직포에 스크린 프린팅해 착용 가능한 건강 모니터링 소자를 만들 수 있었다. 이들은 이 소자를 ECG, 안면과 팔뚝 EMG 등에 시험하였다. 이탈리아의 한 연구소는 기업체와 함께 은 나노입자 잉크를 폴리이미드 천에 잉크젯 프린팅하여 EMG 센서를 개발했다.

### • 센서용 전도성 재료

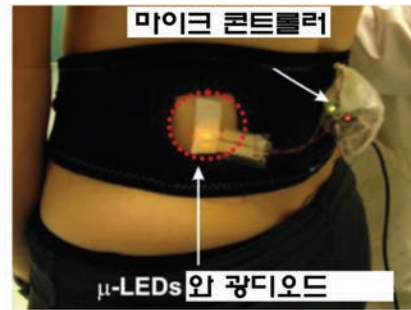
▶ **신장(伸張)센서** - 직물이 피부와 넓게 접촉하면서 신체 파라미터를 센싱하고 모니터링하기 위하여 신장 센서를 사용한다. 이들 센서는 심장 박동속도, 호흡회수, 움직임, 혈압 등의 측정에 쓰인다. 이 목적을 위하여 압전재료와 전도성 재료가 주목을 받고 있다. 벨기에의 한 콘소티움(Ghent 대학의 의류학과가 포함되어 있다)은 Intellitex라는 다목적 의생물학적 옷을 개발했다. 이 옷은 병원에 입원한 어린이들의 심장박동과 호흡을 장시간 모니터링 할 수 있게 한다.

▶ **압력센서** - 압력센서는 스위치, 전자소자와 인터페이스, 사용자의 생명징후(vital sign; 맥박, 호흡, 체온, 혈압 등) 모니터링 등에 사용된다. 영국의 Eleksen사는 전도성 금속 섬유와 나일론 섬유로 구성된 부드럽고 유연한 ElekTex를 시판하고 있으며, 미국 Pressure Profile System사는 고성능 다구성요소 압력과 촉각 센싱 시스템(Tactarray 와 Contacts)을 개발해 제조하고 있다. 불구 아동들을 위한 특수 직물도 개발되어 있다. 예컨대 전도성 직물 두 층 사이에 비전도성



(a) pH 전기화학센서

[pH전기화학센서와 시스템 착용]



(b) 시스템착복

망층이 있는 복합 직물은 압력을 가하면 두 전도층의 접촉이 가능해 전류가 흐르도록 한다.

- ▶전기화학적 센서 - 전기화학적 센서는 실시간으로 땀의 성분, pH 변화 등을 측정할 수 있게 한다. 아일랜드의 국립센서연구센터는 착용 가능한 전기 화학적 센서를 지닌 직물을 개발했다.
- ▶에너지 수확 및 공급 시스템 - 스마트(전자) 직물에 전기력을 제공하는 소자를 심는 방법은 매우 중요한 문제다. 재충전이 가능한 리튬 배터리 등을 섬유나 직물에 직접 접합하기에는 여러 가지 어려움이 있다. 따라서 몸의 움직임이나 열, 태양광 에너지 수집 및 광기전성(photovoltaic) 소자에 기초하여 에너지 수확이 가능한 직물 개발이 진행 중이다.

Infineon사는 압전재료를 결합시켜 신체 운동 에너지를 수확해 MP3 플레이어에 동력을 제공하는 스마트 자켓을 개발 중이다. 영국의 볼튼대 연구팀은 압전고분자 지질에 광전기성 코팅을 입힌 필름과 섬유 구조를 개발해 태양, 바람, 파도 등 자연으로부터 에너지를 수확하는 새로운 기술을 개발했다. 미국 조지아공대의 한 연구팀은 유연한 섬유에 금이 도금된 산화아연 나노선을 코팅해 기계적(운동, 진동) 에너지를 수확해 전류로 전환할 수 있다고 주장한다. 광전지 의류(solar cell clothing)는 첨단 제품으로 가장 큰

관심을 끌고 있다. 이는 군용에서도 매우 중요한 개발 과제다. 일본 Unitika의 Thermoton 천은 태양광을 열에너지로 전환해 저장한다. 이 천 속에 있는 탄화지르콘(zirconium carbide) 미립자가 태양광을 흡수한다. 한편 소형 배터리(산화-아연 배터리)를 천에 프린팅한 후 박막 실링을 한 전자 직물이 독일 프라운호퍼 연구팀에 의해 최근에 개발되었다.

- ▶평면 의류 회로판(Planar Fashionable Circuit Board, P-FCB) - P-FCB 지질은 직조된 천이며, 전도성 에폭시를 실크 스크리닝 하든지 금속파터링(sputtering)을 통해 직물 조각에 직접 평면 전극을 침착시킨다. 회로 판을 우선 천에 실크스크린 프린트하고, IC를 천에 얹어 패턴을 뜯은 전극에 전선으로 연결한다. 마지막으로 IC를 비전도성 에폭시로 몰딩 한다.
- ▶착용 가능한 안테나 - 안테나는 의복 내에 심어 놓은 센서로부터 제어장치로 정보를 전하거나 기타 전자적 파라미터를 모니터링 하기 때문에 착용 가능한 스마트 복장 개발에 필수적이다. 착용 가능한 안테나는 의복을 통신계와 연결시켜주고 전자소자를 눈에 덜 거슬리게 해야 한다. 따라서 평면구조, 유연한 전도성 및 절연성 재료가 특별히 요구된다. 안테나는 얇고 가벼우

며, 보수(관리)가 별로 필요 없게 튼튼하고, 저렴하며 라디오파(RF) 회로에 쉽게 집적이 가능해야 된다. 식물 RFID는 중요한 안테나 해법이다. 스위스의 TexTrace사는 식물 RFID라벨 제조법과 부품을 제공하고 있다. 벨기에의 카톨릭대와 말레이시아의 페를리스대가 최초 공동으로 전직물 도파관(wave-guide) 안테나를 개발했다. 이 안테나는 소형이지만 튼튼하며, 2.45와 5.4 GHz 이중대역 무선근거리통신망(WCAN)에 사용 가능하다.

- ▶ 신축 가능한 연결 - 생의학적 응용에는 특히 변형 가능한 전자회로가 필요하다. 이런 목적으로 전기도금한 꾸불꾸불한 금속선을 신축성 기질 내에 사용한다. PDMS(실리콘) 매트릭스 내에 말굽모양 도선을 내포시켜 신축 가능한 전자회로에 이용하려는 노력이 진행 중이다.

### 3. 보완적 사항

위에서 얘기한 여러 가지 방법마다 서로 다른 특징을 지니며, 전도성, 유연성, 생친화성(biocompatibility), 기계적 감도, 세탁성에 각기 장단점을 갖고 있다. 그러나 어느 방법도 요구 사항을 모두 만족시키지는 못한다.

#### • 전도성 가는 실:

의복은 신축성, 회복성, 전단성(가위질하기)과 감촉 등이 매우 중요하다. 금속선(wire)과 금속 섬유(fiber)의 차이가 종종 분명치 않으나, 독일의 Sprint사는 금속선은 지름이  $30\mu\text{m}$ ~1.4mm, 금속섬유는 2~40 $\mu\text{m}$ 로 구별한다. 전도실의 전도성은 10~500 $\Omega/\text{m}$ 다.

#### • 코팅:

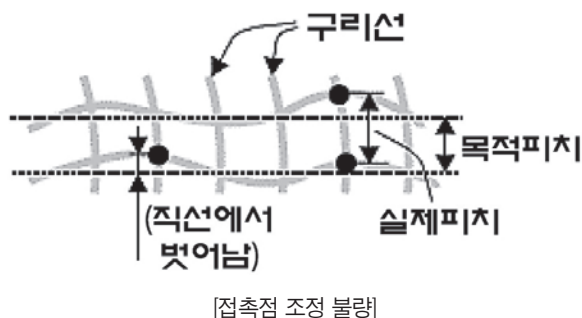
코팅법은 여러 가지 섬유에 적용가능하며, 금속

과 유기 섬유 사이의 접착과 내부식성이 문제를 줄 수 있다. 현재 사용되고 있는 전도성 섬유 제조법은

- ▶ 전도성 충전제(탄소검댕이, 금속선, 흑연과 금속 분말이나 박편(Al, Cu, Ni, Ag))의 사용
- ▶ 전도성 섬유(폴리피롤, 폴리아닐린)와 혼합. 폴리에스테르 천을 폴리피롤로 코팅하면 저항이 크게 감소한다.

#### • 전도성 천 PETEX:

스위스의 ETH(취리히 공대) 연구진은 폴리에스테르 PET 섬유( $42\mu\text{m}$ )와 구리 합금선( $50\mu\text{m}$ )을 함께 짠 PETEX(그림)를 개발했으나, 그림에서 보여주고 있듯이 두 섬유간 접촉점을 조정하기 힘들다는 단점이 있다.



#### • MIT CAD 수놓기:

MIT 연구진은 전도성 실을 천의 1~2층에 한 단계로 수를 놓는 방식(컴퓨터 보조 설계(CAD)이용)을 개발했다. 이 공정은 전도성이 다른 실을 조절하면서 집적화할 수 있게 한다.

#### • 전도성 잉크:

천에 전도성 선로(tracks)를 직접 프린팅 하는 방법은 쉽게 사용할 수 있는 방법이며, 대부분의 전도성 잉크는 은 충전제에 의존한다. 그러나 이 방법의 제한점은 프린팅 두께의 조절이 쉽지 않다는 점이다. 따라서 필요에 따라 프린팅



을 여러 차례 반복해야 한다. 또 한 가지는 천을 접으면(주름지게 하면) 전도성의 균질성이 파괴되어 전기전도성이 변하는 점이다. 프린트 선을 코팅해 프린팅한 회로의 지구성을 개선하기도 한다.

#### • 신축가능센서:

스마트 직물은 전도성 부분이 복잡한 네트워크를 만드는 섬유로 구성되며, 변형중 여러 가지 현상이 일어난다;

- ▶ 접촉점 수의 변화
- ▶ 섬유의 신축
- ▶ 섬유의 단면 감소

열가소성 탄성체(TPE: Thermoplastic elastomer)와 탄소검댕이 입자를 1:1로 섞어 만든 섬유와 TPE와 탄소에 코팅된 폴리이미드 섬유로 구성된 센서들이 눈에 띈다. 사용되고 있는 TPE는 우리들이 스판덱스(Spandex) 또는 라이크라(Lycra)로 알고 있는 탄성 섬유 소재들이다.

## 4. 끝맺는 말

지난해 미국 산타클라라에서 IDTechEX가 Printed-Electronic 회의를 주관했다. 이 회의에서 센소리아사(Sensoria)의 스마트 양말(Smart Socks, 사진<sup>2)</sup>)이 최고착복가능소자상(Best New Wearable Technology Device Award)을 받았다. 이 양말은 은을 기초로 한 신축성, 전도성 실을 함께 직조해 만들었으며 센서들을 자기적 블루투스(Bluetooth) 전자 발목 장치에 연결해 데이터를 무선으로 이동전화기 앱으로 보낸다. 발이 땅에 닿는 회수, 땅에 닿아 있

는 시간 등의 정보가 전달되어 뛰뛰기 선수들의 훈련에 유용하다. 센소리아사는 뛰는 선수의 심장박동수를 추적할 수 있는 셔츠도 개발했다.



이와 대조적으로 미국 뉘퐁(DuPont)사와 일본의 나가세(Nagase Chemtex)사는 각각 은 페이스트와 전도성 고분자(PEDOT)잉크를 개발해 태양전지 개발사에게 잉크를 공급하고 있다. 구두나 운동화창에 압전소자를 포함시켜 걷는 사람이 주는 압력을 측정할 수도 있다.

야외 스포츠복과 배낭 등에 스마트 직물을 사용해 심장 박동수, 체온, 혈압 등 중요 정보를 실시간으로 알아볼 수 있는 스마트 섬유 및 직물의 개발이 우리 눈앞에 와 있다. 이와 같은 제품 및 기술 개발은 스마트 직물—실리콘 통신 칩—을 인터넷에 연결할 배터리가 함께 공존하는 융합기술로만 가능하다. 전자기술을 직물에 접속시켰다고 끝나는 것은 절대 아니다. 옷이란 오랫동안 입을 수 있고, 때로는 보이지 않고 가벼워야 하며, 세탁 가능하고 전자 소자들의 기능이 떨어지지 않고 옷과 수명을 같이 해야 한다. 물론 일부(예컨대 국방용) 응용을 제외하고는 가격 또한 제품과 기술의 상품성을 판단할 중요한 기준이다.

2) 미국화학회 Chemical & Engineering News, 93(48), Dec. 2015, p. 28.