

# 3 웨어러블 디바이스용 유연 전극 연구 개발 동향

글\_최수빈 석사과정 · 김종웅 교수 | 전북대학교 전자정보재료공학과

## 1. 서론

4차 산업혁명의 중심 기술인 사물인터넷 (internet of things; IoT)의 발전과 함께 웨어러블 디바이스가 큰 주목을 받고 있다. 웨어러블 디바이스란 말 그대로 입을 수 있는 전자 소자로 실제로 구글, 인텔, 화웨이, 삼성전자, LG 전자 등 국내외 업체에서 선보이고 있는 스마트 팔찌, 스마트 시계 등이 출발점이라고 할 수 있다 [1]. 이와 같이 현재까지는 주로 액세서리형 디바이스 위주로 상용화되어 있지만, 앞으로 신체 부착형, 생체 이식형 등의 형태로 개발되어 나아갈 것으로 전망된다. 하지만 이러한 환경에서 디바이스가 구동되기 위해서는 신축성, 내구성, 인체 무해성 등 다양한 요구 조건이 동시에 만족 되어야 하므로 이와 관련한 연구가 매우 활발하게 전개되고 있다 [2-4].

웨어러블 디바이스에 이용되는 전극 소재는 매우 뛰어난 신축성을 갖는 동시에 반복되는 변형 하에서도 전기적 특성을 유지할 수 있는

신뢰성을 갖춰야 한다. 기존에는 일반적으로 불투명 전극에는 금속 박막 혹은 인쇄형 금속 배선을, 투명 전극으로는 ITO (indium tin oxide)와 같은 금속산화물을 주로 이용했다. 하지만 금속 기반 소재는 연성을 지니고는 있지만 대체로 탄성 변형한이 크지 않아 신축성 재료로 보기는 어렵고, ITO 등 산화물은 특유의 brittle한 성질로 인해 strain fatigue를 견디는데 제한이 있다 [5]. 결국에는 이들을 대체하기 위한 유연 전극 소재의 개발이 절실하게 요구되는 상황이다. 실제로 대체 소재로 적합한 재료들에 관한 연구가 다양한 논문을 통해 활발히 소개되고 있으며, 금속 나노와이어, 그래핀,



그림 1 ▶ Image of apple watch released in 2015.

금속 메쉬, 전도성 고분자 등의 재료가 가장 대표적인 소재들이다.

은 나노와이어 (Ag nano-wire)는 FCC (face centered cubic) 결정구조인 은의 (100), (111) 면에서의 폴리머와 반응성 차이를 이용하여 성장시킨 나노 두께의 이방 (anisotropic) 형상 소재이다. 전기전도도가 높은 나노와이어를 이용하면 낮은 Percolation threshold로 재료 소모를 줄일 수 있고, 면 코팅을 하게 되면 높은 투과도와 동시에 고전도 특성을 보여줄 수 있다. 또한, 신축성 고분자 소재와의 적절한 구조 설계를 이용하면 신축성도 구현할 수 있다는 연구들이 보고되고 있어, 다양한 전자소자에서 ITO의 대체재로 검토되고 있다. 은 나노와이어를 웨어러블 전극에 이용할 경우에 가장 이슈가 되는 부분은 고신축성과 기관과의 접합력이다. 두 가지 문제 모두 전극으로 이용하려면 중요하게 짚고 넘어가야 할 부분이기 때문에 최근에 이러한 문제를 해결하기 위한 연구 결과가 여러 논문을 통해 제시된 바 있다 [6,7].

그래핀은 육각형의 결정구조를 가지는 탄소 단일층 소재이다. 전자 이동도, 열전도도 및 강도에 있어 매우 우수한 특성을 보이고 있어 발견과 동시에 활발하게 연구되고 있는 소재이기도 하다. 또한 두께가 0.2 nm 수준으로 매우 얇아, 높은 광 투과도를 보여 투명전극으로도 이용이 가능하다. 하지만 전기전도도가 금속 기반의 전극의 수준에 미치지 못하고 건식 공정 시에는 대면적 코팅이 어려우며, 습식 공정 시에는 특성이 저조하다는 문제점이 제기되고 있어 이러한 문제를 해결할 수 있는 방안이 모색되고 있다.

금속 메쉬는 금속박막을 규칙적인 형상으로 가공하여 네트워크를 이루도록 한 소재이다. 금속 기반의 재료이기 때문에 전기전도도는 물론 우수하며, 전체 면적에서 금속 메쉬가 차지하는 비율을 낮춘다면 고투과율도 보인다는 장점을 가지고 있다. 또한 낮은 면 저항으로 인해 대면적 디스플레이용 터치센서로 이미 적용된 사례가 있다. 그러나 이 또한 금속 나노와이어와 마찬가지로 탄성 변형한이 크지 않아 고신축성이 요구되는 웨어러블 디바이스 전극으로 활용하기 위해서는 단점이 극복될 필요가 있다. 실제로도 보완할 수 있는 방법을 연구한 결과가 논문을 통해 보고된 바 있다 [8,9].

전도성 고분자는 절연성을 지닌 대부분의 고분자와는 달리 전도성을 띠는 소재이다. 비효율이 높고, 전도성을 가지고 있으며, 공정 시에 보다 다루기 쉽다는 장점을 가지고 있다. 특히, 내열성과 전도도를 지닌 PEDOT에 친수성인 PSS를 첨가한 PEDOT:PSS (poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonate))는 내열성, 수용성, 공정성 등에서 우수한 특성을 보여, 고분자 소재로써는 가장 주목 받는 전극재료라고 할 수 있다 [10]. 순수한 PEDOT은 낮은 전기전도도를 가지고 있지만 도핑을 통해 전도도를 상승시킬 수 있다는 특성을 가지고 있다. 하지만 이러한 장점에도 불구하고 전기전도도가 금속과 비교했을 때 못 미치는 수준이고, 공기 중에서 산화가 빠르다는 단점이 있다. 추가적으로 전기적 특성을 향상을 위한 연구가 이루어지고 있고, 이러한 점이 개선된다면 웨어러블 디바이스용 유연 전극 소재로써 활용가치가 높다고 볼 수 있겠다.

최근 들어, 앞서 언급한 물질들을 단독으로 활용할 뿐만 아니라 높은 전기전도도, 신축성 및 신뢰성을 얻기 위해 복합 물질을 이용해 유연 전극을 제조하는 연구 결과가 여러 논문을 통해 소개되었다 [11,12]. 본 논문에서는 앞서 언급한 다양한 소재들과 더불어 하이브리드 소재의 최근 연구 동향에 대하여 소개하고자 한다.

## 2. 웨어러블 디바이스용 전극의 요구 특성

웨어러블 디바이스는 크게 액세서리형, 의류일체형, 신체 부착형 및 생체 이식형으로 분류할 수 있다. 이와 같은 다양한 형태의 디바이스에 이용되는 전극은 단순하게 구부러지는 것은 물론, 비틀림, 수축, 늘어남 등 다양한 기계적 변형을 견딜 수 있어야 하기 때문에, 우선 고신축성을 갖춘 소재가 고려 대상이 된다. 구성 소재 사이의 접합력 역시 중요한 특성이다. 만약 접합이 잘 되어있지 않다면 기계적인 변형 하에서 각 재료가 분리될 가능성이 높아 디바이스의 성능 저하가 야기될 수 있다. 또한, 의류 부착형 디바이스의 경우에는 세탁이 가능해야 하므로 기계적 내구성과 더불어 수분에 대한 저항성도 추가적으로 갖춰야 한다.

웨어러블 디바이스는 사용자의 신체에서 혹은 신체 가까이에서 실시간으로 작동 되므로 타인의 눈에 띄지 않는 소자의 형태도 고려하지 않을 수 없다. 이를 위해서는 구성 소자가 투명해야 하므로, 투명 유연 전극의 개발 또한

간과할 수 없는 부분이다. 현재 투명 전극은 대부분 ITO를 이용하여 제조되고 있는데, 결정화 처리 된 ITO는 가시광 영역에서 90% 이상의 투과율과  $10\Omega/\text{sq}$ 의 낮은 면저항을 지니고 있어 투명 전극으로 우수한 특성을 보이지만, 산화물의 특성 상 기계적으로 Brittle하므로 웨어러블 디바이스에 이용하기 적합하지 않다. 이러한 이유로 ITO를 대체하기 위한 활발한 연구에 관해 다양한 논문이 게재되고 있다.

## 3. 은 나노와이어 전극

은 나노와이어는 다공성의 네트워크 구조 형성을 통해 높은 전기전도도와 투과도를 동시에 구현할 수 있는 소재로써, 현재 알려진 ITO 대체 투명전극 소재에서 가장 유망한 물질 중 하나로 알려져 있다. 은 나노와이어를 웨어러블 디바이스용 전극 재료로 이용할 때, 기관과 안정적으로 접합이 되어있지 않으면 기계적 변형 하에서 나노와이어가 기관으로부터 분리될 수 있기 때문에, 기관과의 접합력 증대는 핵심 연구테마의 하나로 분류되어 있다. 최근 이러한 문제를 해결하기 위한 많은 연구결과가 발표되었으며, 그 중 PUU (polyurethane urea)를 이용하여 PDMS (polydimethyl-siloxane) 기관과의 접착력을 향상시켜 압력 센서를 제조하는 과정을 그림 2에 나타내었다 [13].

기관으로 사용된 PDMS는 160~180%까지 탄성 변형이 가능한 고무과 고분자 소재로, Bio-compatible할 뿐만 아니라 내화학성/내광성

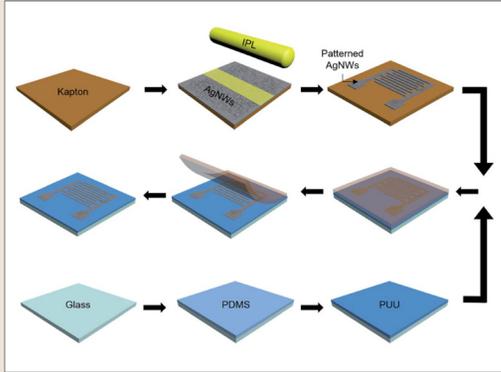


그림 2 ▶ Schematic of the fabrication procedure for AgNW/PUU/PDMS-based pressure sensors.

등이 우수하여 웨어러블 디바이스용 기관 소재로 널리 검토되고 있다. 하지만 표면 에너지가 낮아 상부에 은 나노와이어 분산액을 코팅 시, 코팅성이 불량하며 접합력이 낮아 와이어와 쉽게 분리된다는 단점이 있는데, 이 문제를 해결하기 위해 해당 논문에서는 합성된 PUU를 고무과 신축성 점착제로 이용하였다. 은 나노와이어 표면에 코팅된 PVP (polyvinyl pyrrolidone)의 carbonyl group과 PUU 내의 carboxyl acid group과의 수소결합을 유도하여 나노와이어와의 접합력을 증대시키고, 동시에 산소 플라즈마 처리를 통해 PDMS 표면에 형성된 hydroxyl group과의 수소결합을 통하여, 결과적으로 은 나노와이어 및 PDMS 모두에 접합력이 우수한 소재로 디자인 되었다. 그 결과, 은 나노와이어와 기관 사이의 접합력이 크게 향상되어, 반복 신축 시험 시에도 우수한 안정성을 나타내었다고 한다. 이러한 접근법으로 제조된 은 나노와이어 기반의 센서는 기계적으로 안정적이고 유연하여 신축 하에서도 압력을 감지하는 성능이 저하되지 않았다는 것이 논문에 나타난 결과이다. 해당 연구결

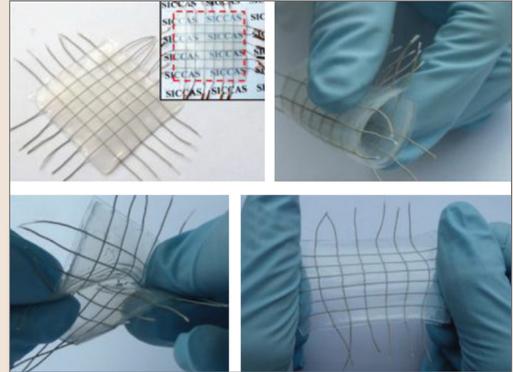


그림 3 ▶ Schematic of the fabrication procedure for AgNW/PUU/PDMS-based pressure sensors.

과는 은 나노와이어 기반의 전극에서 가장 중요한 이슈를 보다 간단한 공정을 통해 개선한 결과를 도출한데 의미가 있다고 판단된다.

한편, 새로운 재료를 활용하여 접합력을 향상시킨 예도 있다 [14]. 해당 논문에서는 스프링 모양의 원사인 SCY (single covered yarn)에 은 나노와이어를 염색하듯이 Dip coating 시켜 유연 전극으로 제조하였고, 신축성 있는 고분자인 PDMS를 기관으로 이용하였다. 이 전극을 이용하여 제조된 전자 피부의 신축성이 그림 3에 나타나 있다. 저자들은 은 나노와이어와 SCY를 통해 제조된 전극이 SCY의 스프링 구조로 인해 비틀리거나 구부러지는 등 다양한 기계적 변형에 견딜 수 있다는 것을 검증하고자 하였다. 이러한 형태의 전자 피부는 압력을 받거나 늘어날 때 strain의 변화율을 감지할 수 있다고 한다. 1.5 Pa의 낮은 압력부터 감지가 가능하고 Fringing electric field 원리를 통해 손가락이 접근하고 터치하는 것까지 감지할 수 있다고 한다. 해당 논문의 저자들은 스마트 의족이나 보철 그리고 휴머노이드 로봇에 이용될 수 있는 유망한 센서라고 주장하고 있다.

해당 논문은 어렵지 않게 구할 수 있는 재료들의 조합을 통해 비교적 유연성이 우수한 웨어러블 소자를 개발한데에 의미가 있다고 판단된다.

## 4. 그래핀 전극

그래핀은 높은 표면적, 뛰어난 전기전도도와 화학적 안정성 등 주목할 만한 특성을 지니고 있어 꿈의 물질이라고 불리며 각광받아 왔다. 하지만 최근에 높은 표면에너지로 실질적으로 이용하기에 어려움이 많고 대량 생산하기가 간단하지 않다는 의견이 많다. 그럼에도 불구하고 고유의 우수한 성질을 활용해 유연한 전극으로써 활용하기 위한 기술 개발이 꾸준히 진행되고 있다. 그림 4는 잉크젯 프린트로 그래핀 기반의 의류일체형 웨어러블 디바이스를 제조하는 과정을 도식적으로 표현한 것이다 [15].

기존에 잉크젯 프린트에서 사용하는 금속 잉크는 높은 전도도를 가지고 있지만 비싸고 생체에 적용하기 적합하지 않다는 단점을 가지고 있다. 해당 논문에서는 rGO (reduced gra-

phene oxide) 잉크를 이용해 그래핀 기반의 전도성 패턴을 형성하였고, 그 결과 신축 내구성을 지니고 있을 뿐 아니라 rGO 잉크와 옷감이 수소결합을 형성하고 있어 세탁도 가능한 전극이라고 주장하고 있다. 그림 4에 보이는 의류처럼 심장 부근에 위치한 전극은 심전도를 측정할 수 있다고 한다.

한편, 신체접촉형 웨어러블 디바이스에 그래핀을 활용한 예가 있다. 그림 5는 그래핀을 이용하여 피부에 부착하는 TENGs (triboelectric nanogenerators)를 제조한 예를 나타내고 있다 [16].

해당 논문에서 저자들은 웨어러블 디바이스에 활용하기 위해 Young's modulus가 낮은 재료로서 그래핀과 PDMS, PET를 선택했다고 한다. 그래핀의 얇은 두께를 이용해 0.3 nm 두께의 그래핀 전극을 제조하였고, 전체 디바이스의 두께도 2.4  $\mu\text{m}$ 로 매우 얇아 굴곡이 있는 손바닥에도 빈틈없이 부착될 뿐 아니라 뛰어난

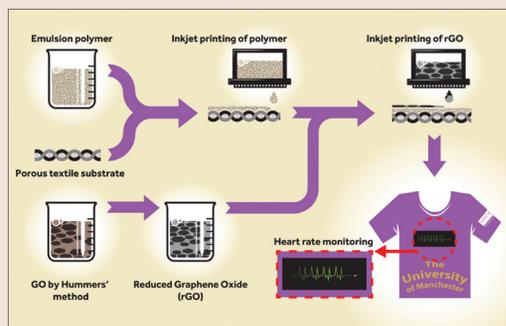


그림 4 ▶ Schematic diagram of the all inkjet-printed graphene e-textile manufacturing process.

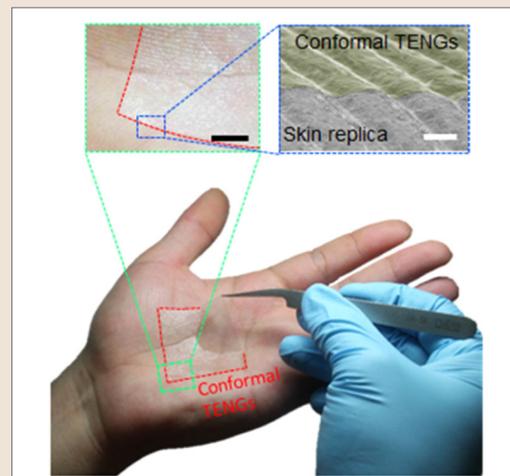


그림 5 ▶ Photographs of the conformal TENGs attached on the palm and the corresponding magnified photo graph (top, left) and SEM image (top, right). Scale bar, 5mm and 300  $\mu\text{m}$ , respectively.

유연성을 가지고 있어 다양한 변형도 견딜 수 있다고 주장하고 있다. 이렇게 제조된 얇은 그래핀 기반 전극은 옷감과의 마찰을 이용하여 마찰 전기를 발생할 수 있는 전극이므로 스스로 전력을 공급하는 웨어러블 디바이스에 적용이 가능하다고 한다. 본 연구는 두께가 얇은 그래핀의 특징을 극대화하여 신체 접촉형 웨어러블 디바이스에 활용했다는 점에서 의미가 있다고 판단된다.

## 5. 금속 메쉬 전극

금속 메쉬는 면저항이 낮고 전체 면적에서 금속이 차지하는 비율이 낮아 투과율이 높기 때문에 투명한 유연 전극으로서 연구된 결과가 많이 있다. 하지만 두 장점은 트레이드 오프 관계에 놓여있어 둘 사이의 적절한 조화가 필요하다. 그림 6에서는 증착된 박막을 이온 밀링하여 금속 메쉬 구조로 제작한 연구결과를 나타내었다 [17].

해당 논문에서는 격자 구조로 형성되어 있는 고분자 희생층에 금속 박막을 증착했고, 희

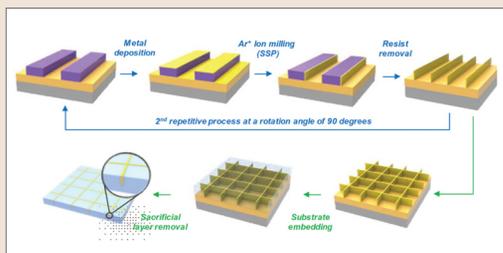


그림 6 ▶ Schematic diagram of the preparation of a transparent tall and thin substrate-embedded metal grid mesh electrode via secondary sputtering.

생층 윗부분의 박막을 에칭시켜 측면에 증착된 금속박막만을 남겼다. 그 이후에 90°로 회전시켜 같은 공정을 한 번 더 거쳐 총 두 번 금속 박막이 증착 됐으며 그 결과, 얇고 긴 금속 메쉬 형성이 가능했다고 한다. 고분자에 내장된 3차원 구조의 은 그리드 메쉬는 가시광 영역에서 85.2%의 투과율과 9.8  $\Omega/\text{cm}^2$ 의 낮은 저항을 보였으며, 헤이즈는 0.55%로 나타났다. 본 논문에서 제조된 3차원 금속 메쉬는 유연 터치 패널의 투명전극으로서 적합한 수준을 지니고 있을 뿐 아니라 추후에 웨어러블 유연 전극을 제조할 때에도 도입할 수 있는 공법이라고 판단된다.

금속 박막을 증착하는 공법은 위 논문과 동일하지만 패턴을 전혀 다른 방식으로 제작한 방식이 소개된 논문도 있다 [18]. 구리를 PET (polyethylene terephthalate) 필름 위에 증착시킨 후, 그 위에 다공성의 PS-b-PAA (polystyrene-b-poly(acrylic acid))를 Breath figure 방식으로 코팅한 다음, 유기 용매에 용해하면 PET 기판위에 구멍이 난 구리필름이 남겨진다고 한다. 이 제조과정은 그림 7에 나타나있다.

여기에서 Breath figure 방식이란, 차가운 물질과 증기가 접촉할 때 생성되는 규칙적인 물방울의 배열인데, 얇은 고분자 필름 위에 형성된 물방울이 증발되면서 구멍이 생기는 현상을 이용하는 방법이다 [19]. 이러한 방식으로 제조된 필름은 최적의 조건 하에서 최대 83.5%의 투과율과 함께 1000번의 밴딩 시험에서도 기계적 안정성을 보여주었다고 한다. 포토리소그래피/에칭과 같은 기존의 보편적인 방식에 비해 공정이 간단하다는 측면에서 의미가 있다고 판단된다.

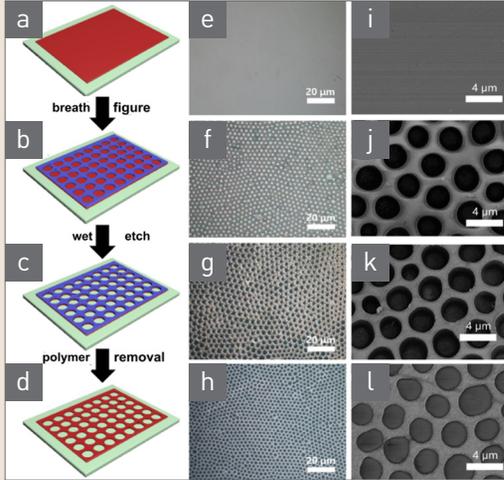


그림 7 ▶ Schematic diagram of the preparation of Cu mesh on PET substrate by breath-figure method and optical microscopy/SEM images.

## 6. 전도성 고분자 전극

전도성 고분자는 절연성을 갖는 대부분의 고분자와는 달리 전도성을 나타내는 고분자로, 공정이 간단해 대량생산이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 전도성 고분자 중 PEDOT:PSS는 전기전도도와 유연성이 뛰어나 대표적으로 연구 개발되고 있다. PEDOT:PSS와 말굽 모양을 가진 원사를 이용해 접촉 시 커패시턴스 변화량을 측정하는 원리로 작동하는 웨어러블 키보드를 제작한 예가 그림 8에 나타나 있다 [20].

말굽 모양의 구조를 가진 원사가 늘어날 경우에 Strain을 흡수할 수 있다는 것이 해당 논문에서 주장하는 바이다. PEDOT:PSS가 코팅된 전극에 30%의 strain을 가했을 때, 매우 작은 수준의 저항 변화가 관찰되었고, 또한 20%의 strain을 1,000회 반복해서 인가하는 시험을 한 이후에도 저항은 10% 정도만 증가되었다고

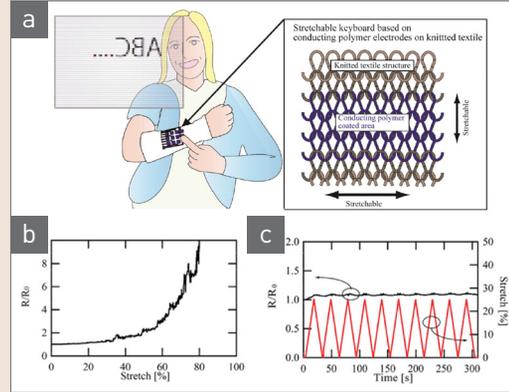


그림 8 ▶ (a) Concept of the stretchable keyboard, showing horseshoe structures in the knitted textile. (b) Stretch test and (c) cyclic stretch test of PEDOT:PSS electrodes on the knitted textile.

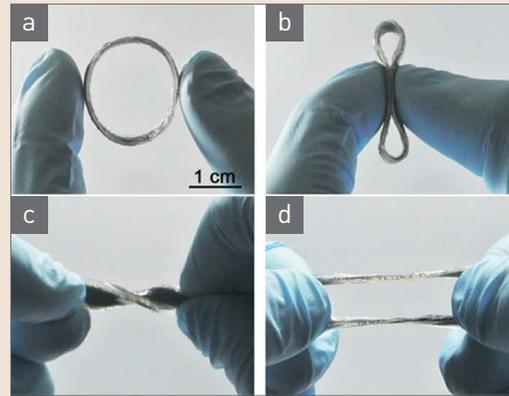


그림 9 ▶ Flexibility and elasticity of the RTSC (ring-type supercapacitor).

한다. 해당 논문의 전극은 원사가 지닌 기존의 특성을 이용해 전도성 고분자를 코팅하는 간단한 공정으로 전극을 제조했다는 점에서 의미가 있다고 판단된다. 상기 논문에서는 옷감의 신축성을 이용해 전극을 만들었지만 다른 소재와 하이브리드화하여 신축성 전극을 제조한 결과도 발표된 바 있다. CNT (carbon nanotube)와 고분자 기판을 활용하여 전극 자체가 유연한 반지 형태의 디바이스가 발표된 바 있다 [19]. CNT를 PEDOT:PSS에 코팅시켜 전기전

도도와 Capacitive 성능을 향상시킨 합성물을 전극으로 이용하였고, 그 위에 PVA-H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 전해층을 형성했다. 이렇게 제조된 반지 형태의 전극은 그림 9에서 알 수 있듯이 다양한 모양으로 변형이 가능할 정도로 유연하다고 한다 [21].

해당 논문에서 제조된 반지 형태의 디바이스는 쉽게 착용이 가능하고 유연하기 때문에 다양한 크기로 제작 및 이용이 가능하다고 한다. 이 논문은 전기전도도가 다른 재료들에 비해 떨어지는 전도성 고분자를 CNT와 함께 이용하여 단점을 보완했다는 점에 의미가 있다고 판단된다.

## 7. 맺음말

본 논문에서는 웨어러블 소자용 유연 전극 소재로 주목받고 있는 소재 중 금속 나노와이어, 그래핀, 금속 메쉬, 전도성 고분자의 연

구·개발 동향에 대하여 리뷰하였다. 기존의 금속 기반 전극과 투명 전극으로 일반적으로 사용되는 ITO는 고유의 성질로 인해 신축성 있는 전극에 이용되기 어렵다는 문제가 있다. 이러한 이유로 웨어러블 전극에 이용이 가능한 새로운 고신축 재료에 대한 관심이 증가하고 있으며, 동시에 연구도 활발하게 이루어지고 있다. 많은 논문을 통해 연구 결과가 보고되었지만 그 중에서 실제로 적용 가능성이 높은 재료를 선별하였고 이와 관련된 연구결과를 소개하였다. 각 물질이 가지고 있는 장점을 부각시키고, 단점을 보완하는 방법을 중심으로 작성하였으며, 리뷰된 결과를 통해 실제로 소재의 부족한 부분을 보완할 수 있는 연구결과가 꽤 많이 보고되었다는 것을 확인할 수 있었다. 현재 웨어러블 디바이스 시장은 초기 단계이지만, 이러한 재료의 성장은 다양한 종류의 디바이스 개발을 이끌 것이고, 결과적으로 웨어러블 디바이스 시장은 빠른 속도로 성장하여 자리매김할 것이 전망된다. 🌐

## 참 / 고 / 문 / 헌

- [1] M. Haghi, K. Thurow, and R. Stoll, *Healthc. Inform.*, 23, 4 (2017).
- [2] Y. Jin, K. Wang, Y. Cheng, Q. Pei, Y. Xu, and F. Xiao, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 9, 4733 (2017).
- [3] X. Wang, B. Yang, J. Liu, and C. Yang, *J. Mater. Chem. A.*, 5, 1176 (2017).
- [4] Y. Gao, H. Ota, E. W. Schaler, K. Chen, A. Zhao, W. Gao, H. M. Fahad, Y. Leng, A. Zheng, F. Xiong, C. Zhang, L. C. Tai, P. Zhao, R. S. Fearing, and A. Javey, *Adv. Mater.*, 29, 1701985 (2017).
- [5] K. Alzoubi, M. M. Hamasha, S. Lu, and B. Sammakia, *J. Display Technol.*, 7, 593 (2011).

[6] H. S. Liu, B. C. Pan, and G. S. Liou, *Nanoscale*, 9, 2633 (2017).

[7] Y. Kim, T. I. Ryu, K. H. Ok., M. G. Kwak, S. Park, N. G. Park, C. J. Han, B. S. Kim, M. J. Ko, H. J. Son, and J. W. Kim, *Adv. Funct. Mater.*, 25, 4580 (2015).

[8] C. F. Guo, T. Sun, Q. Liu, Z. Suo, and Z. Ren, *Nat. Commun.*, 5, 3121 (2014).

[9] J. H. Cho, D. J. Kang, N. S. Jang, K. H. Kim, P. Won, S. H. Ko, and J. M. Kim, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 9, 40905 (2017).

[10] E. J. Bae, Y. H. Kang, K. S. Jang, and S. Y. Cho, *Nature*, 6, 18805 (2016).

[11] Y. Ding, W. Xu, W. Wang, H. Fong, and Z. Zhu, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 9, 30023 (2017).

[12] I. K. Moon, S. Yoon, and J. Oh, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 4, 1700860 (2017).

[13] B. You, C. J. Han, Y. Kim, B. K. Ju, and J. W. Kim, *J. Mater. Chem. A*, 4, 10435 (2016).

[14] Y. Cheng, R. Wang, H. Zhai, and J. sun, *Nanoscale*, 9, 3834 (2017).

[15] N. Karim, S. Afroj, A. Malandraki, S. Butterworth, C. Beach, M. Rigout, K. S. Novoelov, A. J. Casson, and S. G. Yeates, *J. Mater. Chem. C*, 5, 11640 (2017).

[16] H. Chu, H. Jang, Y. Lee, Y. Chae, and J. H. Ahn, *Nano Energy*, 27, 298 (2016).

[17] S. Jang, W. B. Jung, C. Kim, P. Won, S. G. Lee, K. M. Cho, M. L. Jin, C. J. An, H. J. Jeon, S. H. Ko, T. S. Kim, and H. T. Jung, *Nanoscale*, 8, 14257 (2016).

[18] W. Zhou, J. Chen, Y. Li, D. Wang, J. Chen, X. Feng, Z. Huang, R. Liu, X. Lin, H. Zhang, B. Mi and Y. Ma, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 8, 11122 (2016).

[19] Z. Li, X. Ma, D. Zang, B. Shang, X. Qiang, Q. Hong, and X. Guan, *RSC Adv.*, 4, 49655 (2014).

[20] S. Takamatsu, T. Lonjaret, E. Ismailova, A. Masudo, T. Itoh, and G. G. Malliaras, *Adv. Mater.*, 28, 4485 (2016).

[21] L. Wang, Q. Wu, Z. Zhang, Y. Zhang, J. Pan, Y. Li, Y. Zhao, L. Zhang, X. Cheng, and H. Peng, *J. Mater. Chem A*, 4, 3217 (2016).

## 저/자/약/력



**성명** 최수빈

**학력** 2018년 전북대학교 신소재공학부 학사  
2018년 - 현재 전북대학교 신소재공학부 석사과정



**성명** 김종웅

**학력** 2001년 성균관대학교 신소재공학부 학사  
2008년 성균관대학교 신소재공학부 박사

**경력** 2009년 전자부품연구원 책임연구원  
2017년-현재 전북대학교 신소재공학부 교수