

신축성 전극 기술 동향

김도일¹, 황병웅¹, 노은², 이한별¹, 이내응^{1,2,3}

(¹성균관대학교 신소재공학과, ²성균관대학교 나노과학기술학과, ³성균관대학교 융합의과학과)

1. 서 론

지난 수 십 년 동안, 삶의 질적 향상과 인간의 편의를 목적으로 하는 전자 기기의 개발은 국가 과학기술 및 산업의 발전과 국내 기업의 수출 증대를 가져왔다. 특히, 이동성을 가지는 모바일 전자 기기의 경우, 휴대용 PC(노트북, 랩탑)를 시작으로 스마트폰을 지나 스마트폰이 개발되기까지 제품의 소형화와 성능 향상을 위한 과학 기술의 급속 성장이 이루어졌으며, 최근 몇 년 사이에는 세계적인 스마트폰 붐이 일어났다. 하지만, 기존 모바일 기기의 형태와 기능성이 소비자들에게 새로운 콘텐츠를 제시하는 데에 어려움을 겪고 있는 가운데, 많은 전문가들이 머지않은 미래에 스마트폰 판매 및 수출량이 포화 상태에 이를 것이라 예상하고 있다. 한편, 국내외 많은 대학, 연구소 및 기업에서는 이와 같은 모바일 기기(스마트폰, 테블릿 PC)를 기반으로 하는 전자 산업의 성장 잠재력 한계에 대비하여 신기술 창출과 신제품 설계를 위한 다양한 연구개발에 몰두하고 있다. 그 중 현재 가장 활발한 연구가 진행 중인 차세대 전자산업 분야는 웨어러블 컴퓨터(Wearable computer)가 대표적이다.

웨어러블 컴퓨터의 사전적 의미는 ‘컴퓨터를 자유롭게 사용하는 것으로 입거나 의복에 착용 가능한 작고 가벼운 컴퓨터’이며, 넓은 의미에서는 패치 형태로 피부

에 부착이 가능하거나(Skin attachable) 신체 부위에 이식할 수 있는 삽입형(Implantable) 전자기기까지도 포함한다. 의복 형태로 착용이 가능한 전자 제품의 일부는 국내외 몇몇 기업에서 이미 제품으로 출시하여 판매 중에 있다. 디스플레이를 포함한 시계 형태, 다양한 시청각 기능을 가지는 글래스 형태, 인간의 신체 리듬을 실시간으로 모니터링 할 수 있는 팔찌 형태의 기기가 그 예에 속한다(그림 1). 나아가, 일부 회사에서는 피부에 부착하여 보다 민감한 생체 신호를 감지할 수 있는 패치 형태의 웨어러블 기기를 제품화하였으나, 광범위한 사용을 위해서는 아직 연구개발이 더 필요한 상태이



그림1. 웨어러블 컴퓨터의 적용 예



그림 2. 피부에 부착 가능한 제품개발의 예

다(그림 2). 신체부위에 이식할 수 있는 삽입형 웨어러블 기기의 경우, 일부 국내외 대학 및 연구소에서 연구가 진행되고 있지만, 아직 제품화에 가까운 성과를 거두지는 못하고 있다. 하지만, 이와 같은 차세대 전자 기기, 즉, 착용형, 부착형, 삽입형을 포함하는 웨어러블 컴퓨터의 연구 개발 추세를 살펴보았을 때, 가까운 미래에 이러한 기기들이 ‘현재의 스마트폰처럼’ 우리 생활에 밀접하게 들어와 있을 것으로 예상해 볼 수 있다.

현재 제품화되어 있는 대부분의 웨어러블 기기의 경우, 시계, 글래스, 팔찌 등과 같은 악세서리(Accessory) 형태이기 때문에 아직까지는 휘어지거나 늘어날 수 없는 단단한 물질로 구성되어 있다. 하지만, 입을 수 있는 의복 형태로 구현하거나 부착형, 삽입형 웨어러블 기기를 개발하기 위해서는 신축성을 전체 시스템 또는 일부 센서부품에 적용한 제품 개발이 필요하다. 특히, 인간의 피부에서 발생하는 미세한 생체 신호를 모니터링하기 위해서는 피부에 밀착된 형태가 용이하기 때문에, 신축성을 가지는 탄성체(elastomer) 기반의 제품 개발이 이루어져야 한다. 신축성 웨어러블 전자 기기의 제작에 있어 가장 기본이 되어야 하는 부분은 전극이다. 물론 유기발광디스플레이, 박막트랜지스터, 센서 등 단위 소자의 활성층과 같은 기타 물질들도 신축성을 동반해야 하지만, 전자 기기인 만큼 제품 구성의 가장 많은 부분을 차지하는 물질이 회로를 구성하는 배선 및 전극이라 할 수 있다.

국내의 대학 및 연구소에서는 지난 몇 년간 신축성 전극을 개발하기 위한 다양한 연구개발을 수행해오고 있다. 한편, 일부 연구 그룹에서는 투명성을 동반하는 신축성 전극에 대한 연구 결과도 보고한 바가 있는데, 이것은 투명성이 요구되는 웨어러블 기기의 개발을 위한 선행 연구라 할 수 있다. 앞서 기술한 바와 같이 웨어러블 기기의 경우, 착용형, 부착형, 이식형 등으로 나누어지는데, 특히 의복 형태나 피부 부착형 전자 기기의 경우 제품이 눈에 잘 보이는 색을 띠게 되면, 외관상 소비자의 만족도를 떨어트릴 우려가 존재하기 때문이다. 전자제품에 적용 가능한 전극의 경우 기본적으로 비저항이 $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$, 면저항은 $1000 \Omega / \square$ 이하의 특성을 보유해야 하며, 웨어러블 기기에 적용했을 때는 30% 이상의 변형률에서도 안정적인 저항값을 유지할 수 있어야 한다. 나아가 투명 전극으로써 응용성을 가지려면 가시광선 영역에서 최소 80% 이상의 투과도는 필수적이다. 또한 신축성 유기발광다이오드 소자 기반의 신축성 디스플레이의 경우 발광소자 및 터치패널에 적용이 가능한 신축성 투명 전극이 필요하여 면저항 $30 \Omega / \square$ 이하, 가시광선 투과도 90% 이상 수준의 물성을 갖는 신물질의 개발이 필요하다.

본 기술동향보고서에서는 이와 같은 웨어러블 기기용 신축성 전극의 요구 조건에 근거하여, 불투명 또는 투명 신축성 전극의 국내외 기술 동향에 대하여 기술하고자 한다. 신축성 전극을 얻는 방법에는 크게 진성 신축 전극을 이용하는 것과 구조 엔지니어링 기술을 이용하는 것으로 나누어지며, 여기에 TCO(Transparent conductive oxide) 또는 나노 물질과 같은 투명 전극을 형성 하는 기술을 접목시킴으로써 투명 신축성 전극을 구현할 수 있다. 최근 웨어러블 컴퓨터에 대한 관심이 집중되고 있는 가운데, 국내 뿐 만 아니라 해외 연구 그룹에서도 이와 관련된 다양한 연구 결과를 보고하고 있다.

2. 불투명 신축성 전극

최근 신축성 전극을 구현을 위한 기술에는 크게 탄성체와 같이 물질 스스로가 신축성을 가지는 진성 신축성 재료를 기반으로 하는 방법과 신축 시 기계적 안정성을 부여하는 비신축성 소재의 구조 엔지니어링 방법으로

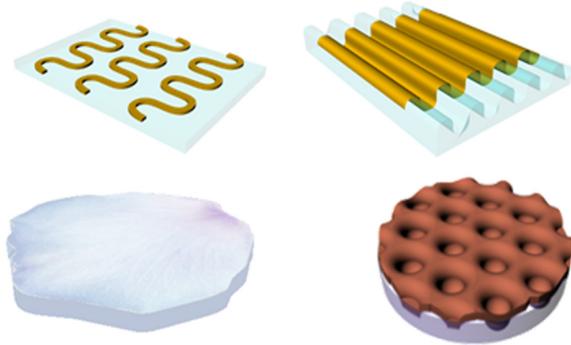


그림 3. 신축성 소재에 활용되는 구조적 엔지니어링의 대표적인 예(구불구불한(serpentine) 구조, 주름진(wrinkled, wavy) 구조, 생체모사 3차원 구조, 모굴패턴 구조)

구분 할 수 있다. 재료 자체가 신축성을 갖게 하기 위해서는 신축성 탄성체 물질에 전도성 고분자 물질 또는 은 나노와이어(Silver nanowire, Ag NW) 등과 같은 전도성 재료를 복합화함으로써 구현될 수 있다. 한편, 진성 신축성을 보유하고 있지 않은 재료에 대한 기계적 안정성을 확보하기 위해서는, 유기물 또는 무기물 금속 재료를 사용하여 응력흡수구조와 결합한 구조 엔지니어링 방법이 활발하게 연구되고 있다. 대표적인 비신축성 소재 기반의 구조적 엔지니어링은 대부분 평면상에 전극물질의 구불구불한(serpentine) 구조를 형성[1]하거나 3차원적으로 주름진(wrinkle or wavy) 구조[2]의 전극을 구현하는 방법이 개발되었으며, 위의 구조는 공통적으로 전극에 인장력이 작용하였을 때 전극에 가해지는 응력을 최소화 시키는 기능을 가진다(그림 3). 하지만 이와 같은 형상은 형성방법의 제한 때문에 여러 방향으로 스트레칭(Stretching) 하였을 때 안정성을 확보하기 어렵다는 단점이 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 최근에는 전방향 스트레칭이 가능한 pop-up 구조[3], 생체모사를 통한 3차원 구조[4], 기판 상에 3차원 마이크로 구조를 형성한 모굴패턴 형성법[5] 등과 같은 3차원 구조 엔지니어링에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

2.1. 진성 불투명 신축 전극

진성 신축성 재료를 활용하는 방법은 나노입자, 나노와이어 등을 PDMS(Polydimethylsiloxane)나 PU(Polyurethane)와 같은 신축성 물질에 인입 및 복합화

하여 만드는 방법과 삼차원의 기공이 존재하는 직물과 같은 형태에 스며들게 하여 만드는 방법(Percolation)이 대표적이다. 연구 예로써, 전도성이 높은 나노물질은 신축성 재료와 아주 작은 기공을 가진 직물에도 잘 섞일 수 있기 때문에 매우 높은 신축성과 안정성을 확보할 수 있는 장점이 있다. 최근에 보고되고 있는 진성 불투명 신축성 전극재료에는 은 나노입자, 나노와이어, MWNT, SWNT 등이 PDMS에 내장되어 있는 구조와 3차원 직물이나 PU 등에 스며들어 있는 구조가 있다.

U. Jeong 교수 연구팀에서는 은 나노입자가 코팅되어 있는 기판 상에 PDMS 용액을 부어 경화시킨 다음 떼어냄으로써 상부에 전도성 나노입자가 기판과 우수한 접착력을 갖고 결합되어 있는 신축성 전극을 제작하였으며, 변형을 40%까지 스트레칭한 상태에서 인장되어 있는 상태에서도 나노입자와 PDMS가 찢어지지 않고 잘 결합되어 있는 것을 확인하였다[6]. 초기 저항 약 13 Ω을 시작으로 변형을 20%에서 300번 반복 스트레칭을 하였을 때 21 Ω까지, 40%에서 300번 반복한 경우에는 38 Ω까지 증가하였다. 두 배 이상의 저항변화를 가져오기는 했지만, 반복 스트레칭 후에서 우수한 전도성을 유지하는 결과를 보였다.

이와 비슷한 접근 방법으로, Y. Zhu 교수 연구팀에서는 은 나노와이어를 실리콘 기판 위에 코팅 한 후에 탄성체 물질인 PDMS를 부어 경화시킨 후 떼어내는 방식으로 신축성 전극을 제작하였다[2]. 개발된 전극은 최초 80% 스트레칭을 한번 시도하고 나면 표면에 구불구불한 구조를 만들어내지만, 구불구불한 구조가 형성된 이후에는 스트레칭 테스트를 했을 때에도 면저항의 변화가 0.5 Ω 이내로 매우 안정한 결과를 보였다. 초기 전도도는 약 8,130 S/cm(면저항 0.24 Ω/□)이며, 50%까지 스트레칭을 해도 5,285 S/cm의 우수한 전기전도도를 보였다.

한편, Y. Cui 교수 연구팀에서는 3차원 기공이 존재하는 직물을 SWNT 잉크에 담가 전도성 나노물질을 코팅하는 방법을 적용하여, 전기전도도가 125 S/cm이며, 면저항이 1 Ω/□ 이하인 신축성 전극을 제작하였다[7]. 개발된 신축 전극은 140%까지 변형을 가했을 때에도, 저항의 변화가 20% 이내로 유지되는 기계적 안정성을 보였다. 이 밖에도 진성 불투명 신축 전극에 대한 활발

한 연구가 진행되어 오고 있으며, 관련 연구 동향을 표 1에 정리되어 있다.

2.2. 구조 엔지니어링 기반 불투명 신축 전극

앞에서 설명한 진성 신축성 재료를 개발하는 방법과는 다르게, 어느 정도의 유연성을 가지는 다양한 유기물 또는 무기물 전도체 재료에 신축성을 부여하기 위하여 구조 엔지니어링을 통한 신축성 전극 개발을 목적으로 하는 연구 또한 활발히 진행되고 있다. 이 방법은 기존에 사용되던 금속박막을 활용할 수 있다는 장점이 있다.

구조 엔지니어링은 2차원 평면에서 이루어지는 (in-plane) 방법과 3차원 마이크로 구조를 형성하는 (out-plane) 방식으로 수행될 수 있다. in-plane 구조 엔지니어링 방법에는 전극의 패턴을 구불구불하게 함으로써 스트레칭 시 구부러진 형상이 완화되면서 전극의 손상을 최소화 하는 방법이 대표적이다. in-plane 구조 엔지니어링 방법의 예로, M. Gonzalez 교수 연구팀에서는 소자의 전극으로 많이 쓰이는 구리, 금, 백금, 니켈과 같은 재료를 연성 기판에 다양한 굴곡의 사인파형태로 도금하여 스트레칭 하였을 때 손상이 적은 신축성 구조를 설계하였다. 구리 전극의 경우 25% 스트레칭 전까지는 끊어지지 않는 것을 확인하였다[11].

반면에, out-plane 구조 엔지니어링의 경우, 신축성이 있는 기판을 특정 변형률까지 미리 스트레칭을 한 상태에서 비신축성 전극을 형성한 후 다시 원상태로 복원 (release)하는 방법을 통하여 주름진 구조를 제작함으로써, 전극 코팅 시 스트레칭한 정도의 변형률까지는 응력을 흡수할 수 있도록 한 pre-stretching 방법이 가장 대표적인 예이다[12]. 하지만 이와 같은 방법은 사용되는 기판과 전극재료에 따라 형성되는 주름의 형태와 신축성이 달라지며, 여러 방향으로의 신축이 어렵다는 한계가 있다.

out-plane 구조 엔지니어링의 또 다른 예로는 미리 당겨 높은 기판에 전극을 옮기는 방법이 Princeton 대학의 Wagner 교수 그룹에 의해 제시되어 이를 활용한 구조 엔지니어링 이 있다[13]. 그 예로, 경성 기판 상에 구불구불한 배선구조를 소자와 함께 형성한 후 미리 당겨놓은(pre-strained) 신축성 기판 상에 옮겨 붙여서 형성한 island-bridge 구조와[14] 직선배선을 경성 기판 상에 형성한 후에 pre-strained 신축성 기판 상에

옮겨 붙여서 형성한 주름진 구조가 있다[15].

미국 일리노이대학 Rogers 교수의 연구 그룹에서 개발하고 보고한 island-bridge 구조는 매우 얇은 실리콘 박막을 신축성 기판에 붙이지 않고 떠 있는 형태로 형성하고, 이것을 소자들 간의 연결다리로 사용하여 실제 소자에 가해지는 응력을 최소화 시키는 방법을 활용하였는데, 연결다리의 모양을 구불구불하게 만들어냄으로써 보다 우수한 신축성을 보유하는 전자 소자를 구현하였다[14]. 하지만 위와 같은 형상을 제작하기 위해 필수적이라 할 수 있는 반복적인 패터닝 공정, pre-stretching과 같은 기판의 전 처리 공정은 신축성 소자를 제작에 필요한 공정 시간을 늘리게 하기 때문에, 최근 간단한 공정으로 제작할 수 있는 신축성 전극 및 소자기술과 여러 방향의 신축성 확보가 가능한 연구의 필요성이 제시되고 있다.

한편 S. Bauer 교수 연구팀에서는 1.4 μ m 두께의 아주 얇은 PET 호일 위에 금, 구리, 은 또는 알루미늄과 같은 금속전극을 형성한 후, 미리 당겨놓은 PDMS 기판 표면에 늘어나는 테이프를 붙인 뒤, 다시 복원하게 되면 표면에 매우 많은 주름이 형성되는 방법으로 신축 전극을 구현함으로써 기계적 안정성을 가지는 신축 전극에 적용하였다[15]. 개발된 신축 전극의 저항은 300%의 스트레칭 후에도 완벽하게 복원 되었으며, 240%까지 스트레칭 하여도 발광다이오드 소자의 연결이 끊어지지 않음을 확인하였다. 보고된 신축 전극은 기존의 pre-stretching 방법에 의한 전극보다 우수한 기계적 안정성을 보였다. 하지만, 전방향 스트레칭에 대한 기계적 안정성에 대해서는 보고하지 않은 상태다.

위와 같은 문제점을 해결하기 위한 방법으로, 최근에는 전방향 스트레칭이 가능한 out-plane 구조엔지니어링 방법 기반의 신축성 전극 개발을 위한 연구가 수행되어오고 있다. 그 예로, 식물의 꽃잎을 본 떠 꽃잎에 존재하고 있는 마이크로의 구조를 지닌 신축성 기판을 제작하여 그 위에 구리전극을 형성하고 이를 활용하여 신축성 스트레인 센서를 제작한 연구가 보고되었다[4]. 이와 비슷한 예로 본 연구팀에서는 스키지형 중 하나인 모굴스키의 울룩불룩한 구조를 본 따서 전방향으로 스트레칭이 가능한 3차원 마이크로 구조를 포토리소그래피(Photolithography) 방법으로 제작하여 변형률 30%

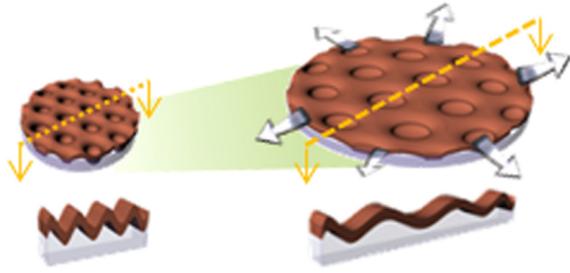


그림 4. 전극물질이 형성된 신축성 모굴 기판에 전방향 인장력을 가했을 때의 전기전도도 안정성 확보 방법

까지 반복 스트레칭 시에도 안정적으로 응력을 흡수할 수 있는 전극 구조를 개발한 연구 결과를 보고하였다(그림 4). 개발된 모굴 기판은 몰딩(molding)법을 이용해 무한 복제가 가능하다[5]. 이 외의 국내외 연구 결과들은 표2에 정리되어 있다.

3. 투명 신축성 전극

최근 투명성을 갖는 신축성 전극을 구현하기 위해 기존의 유연성 투명 전극에 많이 사용하던 소재들을 기반으로 다방면의 연구가 이뤄지고 있다. 그 중 유연성 전극에서 주로 사용되었던 금속나노와이어, 탄소소재, 전도성 폴리머 등의 소재와 탄성체를 복합화하여 전도성을 부여하거나 탄성체에 나노소재를 내장하여 외부의 물리적인 변형이 가해져도 안정적인 기계적·전기적 특성을 확보하는 연구가 주로 이루어지고 있다. 또한, 투명성 전극의 특성 상 전도도와 투과도를 모두 확보해야 한다는 어려움을 극복하기 위하여 두 가지 이상의 소재를 섞어 단점을 보완하는 하이브리드 전극 소재에 관한 연구도 많이 이루어지고 있다.

앞서 설명한 바와 같이 신축성을 확보하기 위해서는 신축성을 갖고 있는 소재를 사용하는 방법과 유연성을 가지는 소재를 응력흡수구조체 상에 형성하는 구조 엔지니어링 방법이 연구되고 있다. 따라서 3장에서는 신축성을 갖는 진성 투명 신축 전극과 구조 엔지니어링 방법을 이용한 투명 신축 전극에 대해 간략히 소개하고자 한다.

3.1. 진성 투명 신축 전극

투명 신축 전극으로 주목받고 있는 소재 중 금속나노

와이어를 먼저 살펴보면 은, 구리, 금 등의 나노와이어를 PDMS 또는 PU 등의 탄성체에 혼합하거나 내장시킴으로써 신축성을 확보하는 방법을 많이 사용하고 있다[17-20]. 이러한 방법으로 구현된 금속나노와이어는 탄성체 내부에서 네트워크 구조를 이루고 있어 기계적 변형 시에도 나노와이어 간의 연결이 지속될 수 있기 때문에 전기전도도를 유지할 수 있으며, 지름이 작은 와이어의 네트워크 구조는 투명성을 확보하는 데에도 유리하다는 장점이 있다. 하지만, 큰 기계적 변형 하에서는 와이어 간의 연결이 유지되더라도 접촉 저항의 변화가 발생하는 문제가 있다.

또한 몇몇 연구그룹에서는 금속 소재를 나노섬유 형태로 제조하여 투명 신축 전극에 적용하는 연구를 진행하였다[21]. 폴리머 또는 탄성체에 금속 전도체를 넣어 제조한 금속 나노섬유의 경우 투과도와 전도도는 어느 정도 확보가 가능하나, 이 방법만을 사용했을 경우 신축성이 충분치 않아, 30%까지의 높은 기계적 변형을 가했을 때에는 전기전도도를 유지하지 어렵다는 한계가 있다.

이외에도 탄소나노튜브(CNT)나 전도성 폴리머를 탄성체와 적절히 혼합하여 제조한 투명 신축 전극도 보고되었다[22-23]. 특히, 탄성체와 전도성 폴리머가 혼합된 복합소재 박막 내부는 전도성 폴리머가 필라멘트 구조로 사방으로 얽혀있어 전류의 흐름(current path)이 높은 변형에도 끊어지지 않고 유지가 되어 기계적 안정성을 확보할 수 있다. 하지만, 탄소나노튜브와 전도성 폴리머가 자체적으로 낮은 신축성 가지기 때문에 이 방법만으로는 신축 전극을 구현하기 어렵다는 문제가 있다. 또한, 충분한 투과도를 얻기 위해 전도성 폴리머 비율을 낮추어야 하는데, 그렇게 되면 충분한 전기전도도를 얻을 수 없기 때문에 투명 전극에 적용하기 어려운 점이 있다.

최근 몇몇 연구그룹에서는 상기 여러 문제점을 보완하기 위한 접근방법으로 하이브리드 소재를 활용하는 연구를 진행하고 있다. 기존의 고질적인 문제였던 금속 와이어간의 높은 접촉 저항, 탄소나노튜브와 전도성 폴리머의 낮은 전도도와 투과도 등을 해결하기 위해 두 가지 이상의 전도성 소재와 탄성체를 섞어 삼성분계 나노복합 투명 신축성 소재를 제조하는 것인데, 삼차원 구

표 1. 진성 신축 전극 연구동향

연구 그룹	방법	전도성	신축성 [%]	투명성 [%]
Z. Bao (Stanford)[8]	CNT/PU composite	945Ω/sq	150	-
Jong-Jin Park (SAIT) [9]	PEDOT:PSS/PUD composite	1000Ω/sq	50	-
Y. Zhu (North Carolina state Univ.)[2]	Ag NW embedded in PDMS	5,285S/cm	50	-
W. Cheng (Monash U.) [10]	CuNW percolation	0.83S/cm	60	-
J.-W. Kim (KETI)[17]	AgNWs/PU	25Ω/sq	50	88
Q. Pei (Univ. of California)[18]	AgNW/acrylate elastomer	17.25Ω/sq	50	80
Q. Pei (Univ. of California)[19]	GO-soldered AgNWs/PUA	280Ω/sq	100	88
Q. Pei (Univ. of California)[20]	CuNW/PU	210Ω/sq	90	70
Y. Cui (Stanford)[21]	Cu nanofiber mesh	12.6Ω/sq	10	80
Q. Pei (Univ. of California)[22]	SWCNTs/PtBA	356Ω/sq	50	77
Z. Bao (Stanford)[23]	PEDOT:PSS/Zonyl/DMSO	46Ω/sq	10	82
N.-E. Lee (SKKU)[24]	AgNWs/PEDOT:PSS/PU	36Ω/sq	30	71.2

조의 삼성분계 복합소재 박막 내부에는 전류가 잘 흐를 수 있도록 금속나노와이어가 네트워크 구조를 이루고 있고 상대적으로 전도도가 낮은 탄소나노튜브 또는 전도성 폴리머 소재가 금속나노와이어 뼈대 사이사이를 연결해주어 전류가 보다 더 효과적으로 이동할 수 있는 다리(bridge) 역할을 한다[24]. 따라서 금속나노와이어의 접촉 저항을 낮출 수 있고 전도도를 향상시켜주는 동시에 충분한 투과도를 얻을 수 있어 우수한 투명 신축 전극 특성을 확보할 수 있다. 관련 연구 동향은 표 1에 도표화 되어있다.

3.2. 구조 엔지니어링 기반 투명 신축 전극

앞서 기술한 바와 같이 신축성을 얻기 위한 또 다른 방법으로 유연성 소재를 응력흡수구조와 결합한 구조 엔

지니어링 방법을 활발하게 연구하고 있다. 그 중 투명 신축 전극에서는 물결(wavy) 구조 또는 주름진(wrinkle) 구조 등에 유연성 소재를 형성하는 방법을 주로 사용하고 있는데, 그 원리는 신축성 기판을 미리 늘린 후 (pre-stretching) 투명 유연성 전극 소재를 형성한 후 다시 놓아 줌으로써 미리 기판을 늘린 만큼은 유연성 소재에 크랙(crack) 등의 박막의 손상 없이 응력을 흡수할 수 있어 신축 전극을 제작할 수 있다[25-27]. 하지만 응력흡수구조체를 이용한 전극의 경우 주름이 심할수록 표면조도가 좋지 않아 우수한 투과도를 얻기 어려운 점이 있으며, 응력흡수구조체를 사용하더라도 저항 변화를 완전하게 막아줄 수 없다. 이와 같은 한계를 극복하기 위한 방법으로 몇몇 그룹에서는 응력흡수구조 상에 신축성을 갖는 나노하이브리드 탄소소재를 형성하여 신축성을 극대화 하는 방법을 사용하여 투명 신축 전극을 제조하는 등의 여러 방면으로 연구를 하고 있다. 이와 같은 방법을 적용하면, 표면조도와 신축성의 조절이 가능하기 때문에,

표 2. 구조 엔지니어링 기반 신축 전극 연구동향

연구 그룹	방법	전도성	신축성 [%]	투명성 [%]
Z. Bao (Stanford Univ.) [9]	wavy structure (pre-strained)	750Ω/sq	20	-
T. Someya (Univ. of Tokyo) [12]	Imperceptible	3.2Ω	50	-
H. Peng (Fudan U.) [16]	arch (pre-strained)	146Ω/sq	450	-
J. A. Rogers (U. of Illinois) [1]	serpentine	-	140	-
J. A. Rogers (U. of Illinois) [3]	pop-up	-	70	-
N.-E. Lee (SKKU) [5]	mogul-pattern	40~56Ω	50	-
Z. Zheng (U. of Polytechnic) [4]	bio-mimic	200,000 S/cm	20	-
U. Jeong (Yonsei Univ.)[25]	Zigzag PEG/Ag/PDMS (after stretching)	17.9Ω/sq	55	70
S. H. Ko (SNU)[26]	AgNWs/CNTs	24-27Ω/sq	>460	>90
S. H. Ko (KAIST)[27]	Long AgNWs (after stretching)	90Ω/sq	460	90

투명 신축성 전극 개발에 좋은 대안이 될 것으로 여겨진다. 이 밖의 구조 엔지니어링 기반 투명 전극 연구 동향은 표 2에 기재되어 있다.

4. 투명 신축성 전극 응용소자

4.1. 신축성 발광다이오드

발광 다이오드는 전류를 가해 빛을 내는 반도체 소자로서, 패널 구성이 단순하여 얇고 가볍게 만들 수 있다. 또한 근래에 구부리거나 접을 수 있을 뿐만 아니라 신축이 가능한 투명 디스플레이 구현에 대한 기대가 확대되면서 투명 신축 전극을 적용한 연구가 활발히 진행되고 있다.

미국 California 대학의 Q. Pei 교수 연구팀은 은 나노와이어를 이용하여 투명 신축 전극을 개발하였는데, PUA(poly (urethane acrylate)) 폴리머 매트릭스 은 나노와이어를 분산시켜 고신축성 전극을 제작하고, 이를 이용하여 5X5 어레이의 발광다이오드 소자를 구현하였다[28]. 또한, 은 나노와이어의 끝과 끝을 산화그래핀(Graphene oxide, GO) 나노시트로 땀납 처리함으로써 스트레칭 시에도 나노와이어 간의 접합이 유지되어 전극의 기계적, 전기적 안정성을 얻어냈다[22]. 은 나노와이어를 적용한 다른 예로, W.S. Kim 교수 연구팀은 은 나노와이어를 스프레이 코팅하여 투명 신축 전극을 개발하였고 이를 소자에 적용함으로써 접거나 스트레칭이 가능한 발광다이오드를 제작하였다[29]. 다른 예로, 서울대학교의 고승환 교수 연구팀은 전기전도도가 높은 은 나노와이어를 이용하여 뼈대(backbone)를 형성하고, 투명성을 띄는 carbon nanotube, CNT로 가지(branch)를 형성하여 신축이 가능한 투명 전극을 구현하였다[26]. CNT-AgNW 전극은 인장 뿐만 아니라 접거나 540도까지 꼬았을 때도 안정적으로 전류가 흐르는 결과를 보여주었으며, 이를 LED 소자의 전극으로 적용하였다.

4.2. 유기태양전지

차세대 에너지 소자로 주목 받고 있는 태양전지는 태양 에너지를 전기로 변환하는 장치이다. 이를 투명 신축

성 디스플레이나 웨어러블 전자 기기에 적용하기 위하여, 투명 신축성 전극을 기반으로 하는 태양전지의 연구 개발이 이루어지고 있다.

미국 Stanford 대학의 Z. Bao 교수 연구팀은 주름진 형태의 PEDOT:PSS 필름을 이용하여 투명 신축성 유기 태양전지를 개발하였다[30]. 개발된 태양전지는 PDMS 기판을 특정 변형률까지 스트레칭 한 상태에서 PEDOT:PSS 및 P3HT:PCBM, EGaIn을 코팅하고 다시 복원하여 주름진 형태를 만들어내는 3차원 응력흡수구조 방법을 이용하여 제작되었다. 한편, Y. Cui 교수 연구팀에서는 전기방사(Electrospinning) 방법을 이용하여 구리 나노메쉬 형태의 신축성 투명전극을 태양전지 소자에 적용하였다[21]. 비슷한 예로, P. Servati 교수 연구팀 또한 전기방사 방법을 이용하여 코어-셸(core-shell) 형태의 투명 신축 전극을 제작하였다[31]. 코어에는 안정성을 높이기 위하여 고분자 PAN을, 셸에는 높은 전도도를 띄는 금으로 구성하였으며, 이 전극을 적용한 태양전지 효율은 기존의 ITO를 기반 태양전지의 효율에 상응하는 결과를 보여주었다.

4.3. 액추에이터

액추에이터는 전기에너지를 공급하여 동력을 발생시키는 소자로서, 자동차, 로봇 등의 부품으로 구성되어 움직임을 만들어낸다. 최근에는 기존 액추에이터 소자를 투명성과 신축성이 요구되는 자동초점 조절 렌즈, 인공피부, 로봇 등의 차세대 전자 응용분야에 적용하기 위한 연구가 투명 신축성 전극의 개발과 함께 활발하게 이루어지고 있다.

미국의 X. Zhao 교수 연구팀은 주름진 그래핀 필름을 이용하여 투명 신축 액추에이터를 구현하였는데, 두 축의 방향으로 미리 인장시킨 고분자 기판 상에 그래핀 필름을 전사하고, 기판을 다시 원래대로 복원시켜서 이를 주름지게 만들었다[32]. 또한, 절연성 탄성 고분자를 이용하여 인공근육 액추에이터로서 가능성을 제시하였다. Q. Pei 교수 연구팀은 유리 기판 상에 은 나노와이어와 고분자 복합체를 한 투명 신축 전극을 구현하였으며, 이를 이용하여 액추에이터를 제작하고 촉각 디스플레이에 응용하였다[33]. 미국 Harvard 대학의 Z. Suo

교수 연구팀은 높은 변형률을 생산할 수 있는 투명 신축 액추에이터 및 환성기를 제작하였다[34]. 우수한 신축성과 높은 투명도를 확보하기 위해서, 이온 전도체와 절연 탄성 고분자를 이용하여 액추에이터 소자를 제작하였으며, 기계적 안정성과 투명성을 동시에 얻을 수 있었다. 나아가, 동일한 소재를 이용하여 투명 신축 전기 화학 변환기를 제작하고 이와 관련된 결과를 보고하였다.

4.4. 그 외 응용분야

미국의 L. Dai 교수 연구팀은 주름진 그래핀을 이용하여 투명하면서도 신축성이 뛰어난 슈퍼 커패시터를 제작하였다[35]. 주름진 구리 호일 상에 그래핀을 성장시키고 그 위에 PDMS를 코팅한 후, 구리층을 제거하여 투명 신축 전극을 제작하였으며, 개발된 전극과 전해액(PVA/H₃PO₄/H₂O)을 이용하여 슈퍼 커패시터를 구현하였다. 이는 차세대 웨어러블 기기의 전원공급 장치 구현과 관련된 선행 연구라 할 수 있다.

국내 성균관대학교 이영희 교수 연구팀은 그래핀-탄소나노튜브를 이용한 투명 신축 전극과 주름진 Al₂O₃를 절연층을 이용하여 투명하면서 인장이 가능한 박막트랜지스터(Thin film transistor) 소자를 제작하였다[37]. 제작된 소자는 사람 피부 뿐 만 아니라, 치약 튜브, 탄성체, 전구 등의 여러 방향으로 굴곡이 심한 표면에서도 안정적으로 전기적 특성을 보여주었다.

P.S. Lee 교수 연구팀은 스프레이 코팅 방법을 이용하여 은 나노와이어 필름을 형성한 후에 그 위에 PDMS를

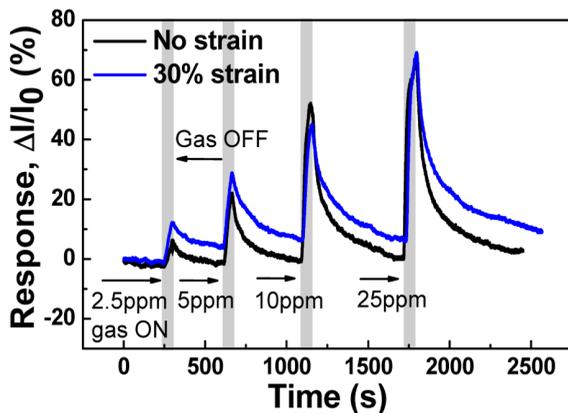


그림 5. 신축성 모폴 기반 상에 제작된 화학센서의 기계적 변형에 따른 NO₂ 감지 특성

표 3. 투명 신축 전극 응용소자 연구 동향

연구그룹	응용분야	재료	신축성 [%]	신축성 구현 방법	투명성 [%]
X. Zhao [32]	Actuator	Graphene	400	구조 엔지니어링	60
Q. Pei [33]	Actuator	Ag NW	15	진성	80
Z. Suo [34]	Actuator	Ion-gel	30	진성	96
L. Dai [35]	Super-capacitor	Graphene	40	구조 엔지니어링	57
J.-U. Park [36]	Bio-sensor	Graphene-AgNW	20	진성	90
Y.H. Lee [37]	FET	Graphene-SWCNT	30	진성	78
Z. Bao [38]	OSC	PEDOT:PSS	20	구조 엔지니어링	96
Y. Cui [21]	OSC	Cu	16	진성	75
P. Servati [40]	OSC	Au	100	진성	81
Q. Pei [28]	LED	Ag NW	120	진성	92
Q. Pei [22]	LED	GO-Ag NW	130	진성	88
W.S. Kim [29]	LED	AgNW	33	진성	80
Q. Pei [41]	LED	AgNW	100	진성	80
S. H. Ko [26]	LED	CNT-AgNW	460	진성	90
H. Zeng [42]	LED	Cu@Cu4Ni	20	진성	80
R. H, Baughman [43]	LED	CNT	85	진성	100
P. S. Lee [39]	Photo-detector	AgNw	100	진성	80
Z. Bao [44]	Pressure sensor	PEDOT:PSS	25	진성	80
Q. Pei [45]	Pressure sensor	AgNW-PU	60	진성	74

코팅하고 다시 떼어내어 제작한 투명 신축 전극을 기반으로 하여 광검출기를 구현하였다[39]. 개발된 소자에 자외선을 인가하였을 때의 반응 시간(Response time)과 자외선을 제거하였을 때의 복구시간 (Recovery time) 각각 0.8초, 3초로 매우 짧게 측정됨으로써, 우수한 광검출 특성을 보였다.

한편, 불투명 신축 전극을 화학 센서 소자에 적용한 일례로, 본 연구팀에서는 앞서 소개한 응력흡수형 모골 기관 상에 전방향 신축이 가능한 금 전극과 환원 산화 그래핀 활성층을 을 기반으로 하는 신축성 화학 센서 소자를 구현함으로써, NO₂ 가스에 민감하게 반응하면서 외부의 기계적 스트레스에 대하여 높은 안정성을 보이는 신축성 센서 소자에 대한 연구 결과를 보고하였다 [5]. 그림 5에서 보이는 바와 같이, 30%의 스트레칭 상태에서 안정적인 가스 검지 결과를 보였다. 이 외에도 국내외 수많은 대학 및 연구소에서 투명 신축 전극을 적용한 다양한 응용소자의 연구를 수행하고 있으며, 관련 연구 동향을 표 3에 정리하였다.

5. 결 론

앞서 살펴본 바와 같이, 웨어러블 컴퓨터 등과 같은 차세대 전자 기기의 제작에 적용하기 위하여 불투명 신축성 전극뿐 아니라 투명 신축성 전극의 연구 개발이 국내외적으로 활발하게 이루어지고 있다. 현재 제품화 되어 있는 대부분의 웨어러블 기기들이 약간의 유연성만을 필요로 하는 악세서리 형태가 주를 이루고 있지만, 나아가 미래에 보편화될 가능성이 높은 의복형, 부착형, 삽입형 웨어러블 기기의 경우 가장 기본이 되는 신축성 전극의 개발과 함께 산업 적용 및 응용성 검토가 하루 빨리 이루어져야 한다고 여겨진다.

하지만, 투명 신축성 전극의 개발은 아직 초기 단계에 있으며, 전자 산업에 적용하기 위해서는 내화학성, 내구성, 기계적 안정성 등의 향상 그리고 신축에 따른 저항변화 최소화 등 해결해야 할 과제가 많이 남아있다. 이러한 점을 고려하여 과감한 연구개발 투자와 함께 국내 대학 및 연구소에서 보다 체계적이고 활발한 연구를 수행해 나가야 한다. 이를 통해 관련 분야의 원천 특허를 미리 확보함으로써 우리나라 과학 기술의 경쟁력을 향상시킬 뿐 아니라, 다양한 경제적 및 사회적 기대 효과를 불러일으킬 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

[1] D.-H. Kim et al., *Science* **333**, 838 (2011).

[2] F. Xu, Y. Zhu, *Adv. Mater.* **24**, 5117 (2012).
 [3] S. Xu et al., *Science* **347**, 154 (2015).
 [4] R. Guo et al., *Adv. Sci.* **2**, 1400021 (2015).
 [5] H. -B. Lee et al., *Adv. Mater.* **28**, 3069 (2016).
 [6] M. Park, Y. Xia, U. Jeong, *Angew. Chem.* **123**, 11169 (2011).
 [7] L. Hu, et al., *Nanon Lett.* **10**, 708 (2010).
 [8] A. Chortos et al., *Adv. Mater.* **26**, 4253 (2014).
 [9] C. -L. Chong et al., *Adv. Mater.* **26**, 3451 (2016).
 [10] Y. Tang et al., *ACS Nano* **8**, 5707 (2014).
 [11] M. Gonzalez et al., *Microelectronics Reliability* **48**, 825 (2008).
 [12] D. J. Lipomi et al., *Adv. Mater.* **23**, 1771 (2011).
 [13] T. Li, Z. Suo et al., *J. Mater. Res.* **20**, 3274 (2005).
 [14] S. Wang et al., *Soft Matter* **6**, 5757 (2010).
 [15] M. Drack et al., *Adv. Mater.* **27**, 34 (2015).
 [16] W. Weng et al., *Adv. Mater.* **27**, 1363 (2015).
 [17] D.-H. Kim et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces* **7**, 15214 (2015).
 [18] W. Hu et al., *Nanotechnology* **23**, 344002 (2012).
 [19] J. Liang et al., *ACS Nano* **8**, 1590 (2014).
 [20] W. Hu et al., *J. Mater. Chem. C* **2**, 1298 (2014).
 [21] H. Wu et al., *Nanon Lett.* **10**, 4242 (2010).
 [22] Z. Yu et al., *Adv. Mater.* **23**, 3989 (2011).
 [23] M. Vosgueritchian, D. J. Lipomi, Z. Bao, *Adv. Funct. Mater.* **22**, 421 (2012).
 [24] B. U. Hwang et al., *ACS Nano* **9**, 8801 (2015).
 [25] D. C. Hyun et al., *Adv. Mater.* **23**, 2946 (2011).
 [26] P. Lee et al., *Adv. Funct. Mater.* **24**, 5671 (2014).
 [27] P. Lee et al., *Adv. Mater.* **24**, 3326 (2012).
 [28] J. Liang et al., *Nat. Photon.* **7**, 817 (2013).
 [29] T. Akter, W. S. Kim, *Appl. Mater. Interfaces* **4**, 1855 (2012).
 [30] D. J. Lipomi et al., *Chem. Mater.* **24**, 373 (2012).
 [31] S. Soltanian et al., *Adv. Energy Mater.* **3**, 1332 (2013).
 [32] J. Zang et al., *Nat. Mater.* **12**, 321 (2013).
 [33] S. Yun et al., *Adv. Mater.* **24**, 1321 (2012).
 [34] C. Keplinger et al., *Science* **341**, 984 (2013).
 [35] T. Chen et al., *ACS Nano* **8**, 1039 (2014).
 [36] J. Kim et al., *Adv. Mater.* **27**, 3292 (2015).
 [37] S. H. Chae et al., *Nat. Mater.* **12**, 403 (2013).
 [38] D. J. Lipomi et al., *Chem. Mater.* **24**, 373 (2012).
 [39] R. Li et al., *Angew. Chem., Int. Ed.* **52**, 5535 (2013).
 [40] S. Soltanian et al., *Adv. Energy Mater.* **3**, 1332 (2013).
 [41] J. Liang et al., *J. Phys. Chem. C Mater.* **117**, 16632 (2013).
 [42] J. Song et al., *Nanon Lett.* **14**, 6298 (2014).

[43] M. Zhang et al., *Science* **309**, 1215 (2005).
 [44] M. Ramuz et al., *Adv. Mater.* **24**, 3223 (2012).
 [45] W. Hu et al., *Appl. Phys. Lett.* **102**, 83303 (2013).

저 자 약 력

이 내 응



- 2010년 4월~현재 : 성균관대학교 신소재공학과 교수
- 2004년 4월~2013년 3월 : 성균관대학교 신소재공학과 부교수
- 1998년 3월~2004년 3월 : 성균관대학교 신소재공학과 조교수
- 1996년 3월~1998년 2월 : 램 리서치 (Lam Research Co., USA) 공정엔지니어

- 1996년 5월 : University of Illinois at Urbana-Champaign, 공학박사
- 1988년 2월 : 서울대학교 금속공학과, 공학석사
- 1986년 2월 : 서울대학교 금속공학과, 공학사
- 관심분야 : 스트레처블 및 플렉시블 전자소자, 나노기반 물리, 화학 및 생화학 센서, 나노바이오 소재 및 응용기술

김 도 일



- 2012년 9월~현재 : 성균관대학교 신소재공학과 공학박사과정
- 2012년 8월 : 성균관대학교 신소재공학과 공학석사
- 관심분야 : 스트레처블 및 플렉시블 전자소자, 나노기반 물리센서

황 병 응



- 2013년 3월~현재 : 성균관대학교 신소재공학과 공학박사과정
- 2013년 2월 : 성균관대학교 신소재공학과 공학석사
- 관심분야 : 스트레처블 및 플렉시블 전자소자, 나노기반 물리센서

노 은



- 2013년 9월~현재 : 성균관대학교 나노과학기술학과 석박통합과정
- 관심분야 : 스트레처블 및 플렉시블 전자소자, 나노기반 물리센서

이 한 별



- 2014년 3월~현재 : 성균관대학교 신소재공학과 공학석박사 통합과정
- 관심분야 : 스트레처블 및 플렉시블 전자소자, 나노기반 화학 및 바이오 센서