

플렉시블/웨어러블 일렉트로닉스 최신 연구동향

강 석 희* · 홍 석 원*†

*부산대학교 나노과학기술대학 인지메카트로닉스공학과

Recent Progress in Flexible/Wearable Electronics

Seok Hee Kang* and Suck Won Hong*†

*Dept. of Cogno-Mechatronics Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

†Corresponding author : swhong@pusan.ac.kr

(Received June 12, 2014; Accepted June 17, 2014)

Abstract

Flexible devices have been developed from their rigid, heavy origins to become bendable, stretchable and portable. Such a paper displays, e-skin, textile electronics are emerging research areas and became a mainstream of overall industry. Thin film transistors, diodes and sensors built on plastic sheets, textile and other unconventional substrates have a potential applications in wearable displays, biomedical devices and electronic system. In this review, we describe current trends in technologies for flexible/wearable electronics.

Key Words : Flexible device, Wearable device, E-textile, Printable electronics, Display

1. 서 론

2000년대 초반 미국의 벨 연구소에서 유기물 기반의 플렉시블 디스플레이의 기초 연구 결과를 제공한 이후 제반 연구가 꾸준히 진행되어 왔으며 다양한 소재의 적용 기술발전으로 인해 플렉시블을 넘어 웨어러블 디바이스가 전자산업의 돌파구 및 새로운 시장을 창출하기 위한 큰 연구 관심사로 인식되고 있다¹⁻⁸⁾. 1차 모바일 혁명이라고도 명명된 스마트폰 기술의 발전은 2009년 아이폰 출시 이후 폭발적인 증가세를 보이며 크게 성장해 왔으며 이제 성숙기에 접어들었다. 현 시점에서 향후 스마트폰을 대체할 수 있을 것으로 예상되는 차세대 모바일 기술로 플렉시블(flexible) 또는 웨어러블(wearable) 디바이스를 꼽을 수 있다. 이러한 새로운 형식의 디바이스 시장은 삼성전자, 애플, 구글 등과 같은 ICT 분야의 기술 선도 기업뿐만 아니라 나이키, 리복, 아디다스와 같은 스포츠 관련 기업들까지 포함하는 다양한 영역에서 혁신적인 아이디어를 표현하는 제

품들이 출시되고 있다⁹⁻²¹⁾. 더 나아가 전자정보기술과 의료분야의 융합, 군사 및 소방안전 분야의 혁신과 같은 다양한 산업에서의 새로운 시도들이 이루어지고 있는데 이를 실현하기 위해서는 플렉시블 소재/소자를 기반하는 웨어러블 디바이스 기술이 반드시 뒷받침 되어야 한다. MIT 대학 미디어랩(Media Lab)에서 내린 정의에 따르면, 웨어러블 디바이스란 '인체에 부착하여 컴퓨팅이 가능한 모든 종류의 전기/전자 소자로 구성된 모든 기기를 일컫는다. 이를 구현하기 위해선 전기/전자 소자의 소형화, 경량화, 저전력 구동화가 필수적이며 소재적 관점에서 보았을 때 마치 우리가 입는 직물과 유사한 형태의 다양한 방향으로 휘어지거나 늘어나며 이러한 상황에서도 성능이 떨어지지 않는 전기/전자 디바이스를 구현하는 요소기술의 개발이 요구된다. 본 리뷰 논문에서는 플렉시블/웨어러블 디바이스를 구현하기 위한 새로운 형식의 공정 요소기술의 연구 개발 동향에 대해 기술하였으며 향후 시장 형성 및 연구 개발 방향에 대해서 전망하였다.

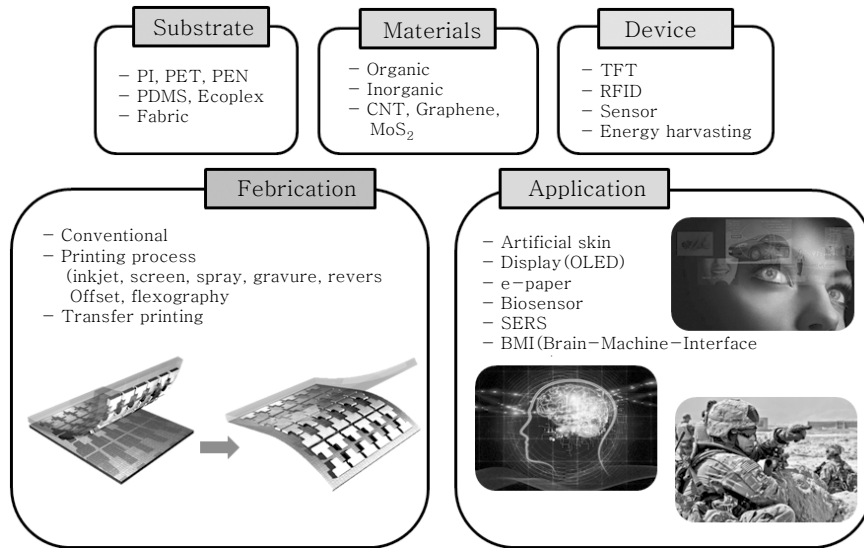


Fig. 1 Overview of flexible/wearable electronic devices

2. 플렉시블/웨어러블 디바이스 구성을 위한 요소기술

2.1 기판

플렉시블 디바이스의 구현을 위해서는 다양한 공정에 부합하는 유연기판들이 가장 최우선적으로 필요한데, 특히 플렉시블 기판은 최종적으로 완성된 디바이스의 공정기술, 성능, 신뢰성, 제품의 가격을 결정하는 가장 중요한 부품으로서 최근 들어 산업적인 주목을 받고 있다. 플렉시블 기판 중에서는 플라스틱이 가공의 용이성, 무게절감, 반도체 연속공정의 적합성으로 인해 적용이 광범위하게 검토되고 있지만, 디바이스 장착을 위한 기판으로서 많은 문제점을 안고 있다. 이를 해결하기 위해 플라스틱 기판의 열적, 화학적 특성을 향상시키거나, 플라스틱 기판을 이용한 반도체 공정에 적합한 저온 형성용 유/무기 소재 및 공정을 개발하는 연구가 많이 진행되고 있다. 일반적으로, 디바이스에 휘어지는 성질을 부가할 수 있는 대표적인 기판으로 PI (Polyimide), PET (Polyethylene Terephthalate), PEN (Polyethylene Naphthalate) 과 같은 플라스틱이 활용되고 있으며, 신축성을 부여하기 위해 고무소재로 알려진 PDMS (Polydimethylsiloxane) 등을 이용하는 연구가 꾸준히 보고되고 있다²²⁻²³⁾.

플렉시블 기판으로 산업계에서 가장 주목하는 분야는 휘어지는 디스플레이 기판으로 획기적인 플랫폼 기술개발로 이어질 것으로 예상되는 투명 플라스틱 필름이다. 기존의 범용 투명 플라스틱 필름을 개량한 다양한 소재가 개발되어 있거나 개발이 진행되고 있다. 하지만 기존 투명 플라스틱 필름만으로는 열처리에 따른 기판의

수축, 팽창에 따른 치수 및 형태의 변화로 인해 디스플레이 기판으로서 취약한 특성을 보이므로 이를 극복하기 위한 방편으로 기본 열처리(aging) 및 다양한 소재를 이용한 코팅기술이 요구된다.

최근 전자잉크 기판으로 적용이 시도되어서 크게 주목을 받고 있는 투명 PI(Polyimide)소재를 비롯해서 PC(polycarbonate), PES(polyethersulfone) 그리고 PAR(polyarylate)와 COC(cyclic olefin copolymer) 등 다양한 소재의 고분자 필름들이 플렉시블 디스플레이 기판으로 사용가능한 후보로서 지속적인 기판 개발과 플렉시블 디스플레이 개발에 응용되고 있다. 또한 기존에 쓰고 있는 PET(Polyethylene Terephthalate)의 표면을 개질하여 쓰거나 새로운 형식의 공정기술 개발로 플라스틱 기판이 갖고 있는 약점을 극복하는 연구개발이 활발히 추진 중이다.

플라스틱 기판의 기본적인 특성 중 미래형 디스플레이로 제시되고 있는 투과형 디스플레이의 경우 광학적 투명도와 표면조도 등이 요구된다. 특히 기판의 광학 등방성 유지 및 내열성을 향상을 통한 최대 허용 공정 온도를 상승이 중요한 특성으로 고려되고 있는데 이에 관한 광학 특성은 헤이즈(haze), yellow index 등이 있다.

플라스틱 기판으로 반도체 소자 구현을 위해 요구되는 또 하나의 특성은 디스플레이 공정에 대한 적합성이라 할 수 있다. 기존 디스플레이 공정은 유리 기판을 이용하여 반도체 공정을 기반으로 하는 플라즈마 고온 공정, 금속증착 및 다양한 화학적 세정 공정을 포함한다. 이러한 공정에 대한 공정 적합성이 플렉시블 기판의 사용 여부를 결정하는 중요한 요소가 된다. 즉 고온

안정성과 정밀 리소그래피 공정을 위한 낮은 열팽창계수 그리고 각종 화학 용제에 대한 내화학성 등이 필요하다. 따라서 저온 공정 적용이 가능한 차세대 신소재(유-무기 화합물)의 적용을 통한 표면개질 또는 현재의 반도체 공정을 이용하지 않는 비전통방식의 신개념 공정을 개발하거나, 기존 합성기술을 개량한 기관의 내열성을 향상시켜 최대 허용 공정 온도를 높이고자 하는 노력을 하고 있으며, 공정 디자인 설계시 플라스틱의 취약한 치수안정성을 고려한 오차(misalign) 범위를 고려한 설계로 이를 극복할 수 있음을 여러 논문으로 보고되고 있다.

또한 플라스틱 기관으로 또한 요구되는 특성은 제품 완성후의 신뢰성 유지 및 안정성이다. 즉 현재 사용되고 있는 유리 기관 상에 구현된 디스플레이 구현기술 대비 얼마나 안정성을 확보할 수 있는가 하는 것이다. 플렉시블 기관을 고분자 필름으로 구현하는 경우 유리 기관과 비교했을 때 가장 큰 차이점으로 제시되고 있는 약점은 기체에 투과 특성이다. 유리는 기체 투과를 하지 않는 반면 고분자 필름은 제품완성 후 시간이 지남에 따라 공기 중의 수분이나 산소를 투과시켜 완성된 디스플레이 발광소자(특히 OLED, OTFT와 같은 유기물 소자) 내부로 수분과 산소가 투과되어 흑점이 발생하거나 소자의 수명이 급격히 저하되는 현상을 보이게 된다. 따라서 고분자 필름을 디스플레이 기관으로 사용하는 경우 플라스틱 기관상 고효율의 기체투과 방지막을 형성시켜 수분과 산소를 차단해 줄 필요가 있다.

섬유소재는 최근 가장 활발하게 웨어러블 디바이스에 적용되고 있는 소재로 고도로 발달된 반도체 소자 구현 기술의 발전으로 직조된 섬유의 유연기관으로써의 가능성이 꾸준히 연구되어 오고 있다. 다시 말하자면 섬유가 단순히 전통적인 의류에만 국한되지 않고, 반도체 산업용으로도 매우 중요한 기관 소재로 인식되면서 새로운 섬유의 개발이 활발하게 진행되고 있다. 2000년대 중반 MIT에서 기초연구로 제안되었던 입을 수 있는 컴퓨터의 구현을 위해서 시작된 스마트 섬유는 좁은 의미로는 환경대응 또는 자기감응 기능을 갖춘 섬유를 의미하지만, 현재는 좀 더 폭넓은 의미로 미래 지향적 반도체 기술 기반으로 기존 섬유에서 발전 가능한 전자소자를 구성하는 섬유를 포괄하는 넓은 개념으로 이해되고 있다. 현재 예고되는 미래형 기술은 가젯(gadget) 형태의 단순히 디지털 기기를 옷에 부착하는 단계를 거쳐 2030년경에는 디지털 연산기능을 완전히 내장하는 단계까지 발전할 것으로 예상되고 있다. 이에 따라 웨어러블 컴퓨터(wearable computer) 구현과 동시에 스마트 의류(smart clothing), 디지털 의류(digital

clothing), 인텔리전트 웨어(intelligent wear), 전자 텍스타일(electronic textile) 등의 신조어들이 더 많이 사용되고 있다. 한국의 경우도 정부차원에서 스마트 섬유가 미래 유망산업이 될 것으로 판단하고 국가 신성장 동력으로 육성하고 있는데, 산업원천기술로드맵 섬유의류 분야를 보면 섬유물질 자체에 기능성을 부여한 생각하는 섬유(intelligent 섬유), 건강복지증진 섬유(LOHAS 섬유), 극한환경 섬유(super 섬유), 융합기능 섬유(6T 융합 섬유) 등을 포함하는 스마트 섬유라는 용어가 사용되고 있으며 의류패션 소재, 생활환경 개선용 섬유, 반도체 산업용 섬유 등 3대 분야 속에서 다양한 스마트 섬유를 개발하고 있다.

플렉시블 플라스틱 소재와 마찬가지로 e-textile 분야의 가장 문제가 되고 있는 부분은 온도변화에 따른 고분자 기관의 수축 변화로 이러한 문제를 제어하는 것이 가장 주된 관심사이며 이를 극복하기 위해 유리 섬유(fiber glass) 직물로 내열성을 강화한 고분자 필름 기관이 개발되는 등 섬유를 이용한 반도체 구현기술과 플렉시블 디스플레이 기술도 점차 기술 범위를 좁혀나가고 있는 중이다. 이를 통한 최근 개발 기술로는 섬유/반도체 기술 융합이 활발히 이루어지면서 실(fiber) 형태의 우수한 전도성 섬유가 개발되고 있으며, 일예로 스웨덴의 Linköings 대학에서는 스크린 프린팅 기법을 이용하여 직물 구조를 갖는 유기 트랜지스터(textile organic transistor) 까지 구현하는 등 미래 전자섬유의 새로운 가능성을 실현하고 있다.

전자섬유의 기술개발은 섬유에 유기전자소재를 접목시켜 안정성을 확보하는 기술과 트랜지스터를 이용한 전자섬유 회로설계 기술, 전자섬유와 단일소자 연결 기술 등에 집중하고 있으며 개발된 직물 기반 전자부품으로는 전도성 실을 이용한 광소자개발, 안테나 기술 등의 직물 회로와 pH 센서, 비접촉 정전용량 센서, 압력 센서, 온도센서, 습도센서 등의 다양한 센서소자 그리고 물리적인 움직임으로부터 섬유 자체가 에너지를 발생하는 에너지 하베스팅 기술 등이 개발되고 있고, 향후 이러한 전자부품을 섬유 속에 부착 또는 삽입하거나 직물 형성 그 자체가 소자가 되는 방법들이 꾸준히 제시되고 있다.

2.2 배선 소재

일반적으로 전자소자의 배선에 이용되는 금, 은, 구리와 같은 금속 소재가 플렉시블 웨어러블 디바이스에 직접적으로 적용되기 힘든 이유는 기계적인 강직성에 기인하는데, 실제 사용 범위에 따라 기관이 휘어지거나

늘어나는 경우에 기관의 상부와 하부에는 인장응력과 압축응력이라는 반대 방향의 힘이 가해지게 된다. 하지만 이러한 경우에도 기계적 중립면이 존재하게 되는데 적절한 소재의 적용과 더불어 이러한 원리를 효과적으로 활용하는 것이 필요하다²⁴⁾. 이러한 원리를 이용하여 금 배선을 플라스틱 기관사이에 위치시키고 배선이 뱀모양으로 구부러지는 디자인을 적용하여 신축성을 향상시켜 사람의 표피에 직접적으로 접촉이 가능하도록 만든 전자 디바이스가 최근 몇 년간에 걸쳐 지속적으로 보고되었다²⁵⁾. 나아가 온도와 물리적 변형까지 측정이 가능한 다기능적인 소자구현이 가능하다는 것까지 구현함으로써 다양한 응용범위를 갖는 웨어러블 디바이스에의 적용 가능성을 확대시켰다.

현재 가장 주목받는 배선관련 연구 분야는 용액상으로 분산되어 있는 절연체, 반도체, 또는 금속기반 도체 나노입자 소재를 잉크젯프린팅이나 여러 종류의 직접 인쇄 기술을 통해서 전자 회로를 다른 추가적인 리소그래피 방법을 사용하지 않고 플렉시블 기관에 직접 인쇄하여 제작하는 방식의 채택을 가장 선호하고 있다. 이를 인쇄전자로 분류하는데 이러한 방식을 이용하여 전자소자를 제작하기 위해서 가장 중요한 소재적인 요구사항은 우선 플라스틱 또는 유연섬유소재 기관을 사용함으로써 재료의 공정온도가 월등히 낮아야 하며, 또한 원하는 소자에 적용하기 위해 필요한 전기적 물성을 보유하고 있어야 하며, 또한 원재료의 신뢰성을 가장 크게 요구하고 있다.

인쇄전자 기술을 응용한 전도성 잉크재료는 RFID (radio-frequency identification) 태그의 안테나 제작, 소자를 직접 연결하는 접촉전극 형성 및 각각의 소자 간의 연결에 필요한 전극 라인 형성 등에 주로 사용되는데, 이 때 형성되는 전도성 배선에 필요한 가장 중요한 물성은 낮은 저항값이다. 가장 활발하게 연구되어지는 대표적인 전도성 잉크재료는 전도성 고분자용액, 금속 나노입자가 분산된 용액, 탄소나노튜브(carbon nanotubes) 분산용액 및 이를 응용한 복합소재를 예로 들 수 있다²⁶⁾. 이들 재료는 각각 단점과 장점을 동시에 보유하고 있어서 현재 소자구성을 위한 모든 요구사항을 충족시키기 위해서는 공정기술의 확립을 통한 각각의 융합 성격을 갖는 복합소재 개발이 필요하다. 현재 상업화 가능성이 가장 크며 대규모의 연구투자가 이뤄지는 금속 나노입자의 경우 RFID에 응용되기 위해 충분한 만큼 패턴 크기 대비 높은 전도도를 보유하고 있으나, 이들을 분산시키기 위해 사용되는 화학물질을 제거하기 위해서 비교적 높은 소결온도(~150°C)를 요구하므로 플렉시블 기관상 적용에 어려움이 있다. 따

라서 좀 더 낮은 온도에서 공정이 가능한 인쇄공정의 개발과 소결온도에 영향을 주지 않는 분산 물질을 개발하는 것이 필요하다. 또한 전도성 고분자의 경우 높은 분산특성과 낮은 공정온도로 공정성이 가장 용이하나, 전도도가 금속 나노 입자에 비해 물리적인 특성이 떨어지는 단점이 있어 이를 보완하는 방편으로 하이브리드 형태의 혼합물을 합성하는 것이 제시되고 있다. 탄소나노튜브 분산용액은 그 물질 자체로는 일반적인 물 또는 유기용매에 분산이 어려워 표면이 화학적으로 개질된 탄소나노튜브를 용매에 분산시켜 잉크로 사용하고 있다. 금속 나노 입자보다는 분산도는 낮으나 비교적 높은 전도도와 낮은 공정 온도 때문에 최근에 활발히 연구되고 있다.

인쇄전자기술로 제시되는 배선관련 도체 및 반도체 잉크재료는 RFID 태그의 정류기, 인쇄전자 기반 트랜지스터 및 메모리 소자 등으로도 사용되는 핵심 부품소재로서 이동도나 메모리 특성과 같은 소자의 성능에 가장 중요한 영향을 미치기 때문에 대규모 연구투자가 절실히 요구되고 있는 재료이다.

2.3 구동소자

박막 트랜지스터 소자를 플렉시블 디바이스에 적용하기 위한 현재 개발된 최신 기술로는 기존의 반도체 공정에 쓰이는 장비를 활용하여 실리콘 나노 리본을 제작하여 적용하는 방법이 있다. 이러한 박막 실리콘 리본은 SOI(silicon on insulator) 웨이퍼를 이용해 구현이 가능한데 MEMS기술과 우수한 반도체 식각장비의 기술 발전으로 일반적인 리소그래피 공정을 통해 산화실리콘 박막위에 실리콘 전체 공정을 진행한 후 전사기술을 거쳐, 원하는 고분자 플라스틱 또는 직조된 섬유직물 기관상 전사가 가능하다. 이러한 공정을 이용한 단결정 무기물 기반의 트랜지스터 구현 기술은 산업에의 직접 적용이 좀 더 용이하다는 매우 큰 장점이 있다. 나노 두께를 갖는 실리콘 트랜지스터의 성능은 일반 웨이퍼 형식의 트랜지스터와 유사한 성능을 갖고 있으며 기계적 특성이 우수하여 단일 소자의 직접 전사를 통한 집적화 기술을 응용한다면 매우 복잡한 회로 구성도 가능하다는 전망이다.

그 외, 주로 연구되고 있는 플렉시블 트랜지스터 형성 기술은 저가의 공정이 용이한 유기물 기반으로 한 공정이 있다. 이러한 유기물 트랜지스터를 제조하기 위한 방식으로는 다양한 프린팅 기법, 스핀 캐스팅, 기상증착법 등이 적용 가능하며 매우 유연하여 깨지지 않는다는 점이 주목할 만하며 기존 실리콘 소자에 비해 안정성과 재현성 등이 떨어진다는 문제점이 있으나 꾸준

히 연구되고 있는 분야이다. 유기물 반도체 재료가 지닌 물질의 전기적인 특성상 이론적으로 수십 cm^2/Vs 이상의 전하 이동도는 얻을 수 없고 실제로 얻어지는 전하의 이동도는 용액공정을 통해서 세계적으로 가장 우수한 특성이 $0.1\sim 3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 정도로 비교적 낮은 실정이다. 따라서 이러한 낮은 성능으로 인해 기존의 화합물 반도체, ZnO 등 금속 산화물 같은 무기물 반도체 재료를 나노입자 형태로 만들고 용액상태로 제조한 무기물 반도체 재료에 대한 연구도 최근 활발히 진행되고 있다. 이들은 모두 인쇄전자 기반 프린팅 공정의 안정성 확보에 중요한 분산도 유지 및 입자간의 균일성 유지 등이 분산 안정성이 유기물 재료에 비해서 상대적으로 낮다. 하지만 그 소재들이 갖는 우수한 물리적 특성은 미래 트랜지스터, 다이오드 등과 같은 투명 전자소자 제조에 매우 큰 장점을 갖고 있다. 비정질 금속산화물 반도체의 경우 디스플레이용 구동소자로서 연구되고 있는 소재인데 우수한 전하이동도 및 높은 밴드갭 에너지를 가짐으로 인한 투명성으로 적용 가능성이 활발히 대두되고 있다.

마지막으로 탄소기반 나노소재의 등장으로 매우 큰 발전을 이루고 있는 연구개발 부분이 탄소나노튜브나 그래핀을 이용한 구동소자의 구현이며 이들 소재의 강한 기계적, 물리적 물질 특성으로 인해 플렉시블 또는 웨어러블 소자 구현에 매우 적합하다는 평가를 받고 있고 수많은 논문을 통해 그 가능성을 확인하고 있다. 탄소나노튜브의 경우 플렉시블 트랜지스터 구현을 위한 가장 큰 주목을 받는 부분은 매우 월등한 이동도 특성으로 인해 실리콘을 대체할 수 있는 물질로 제안되고 있으며, 반도체 특성을 띄는 단일벽 탄소나노튜브의 대량생산 공정의 확립으로 웨어러블 소자 구현을 위한 가장 큰 대표 소재로 확인되고 있다. 그래핀의 경우 탄소나노튜브의 발전 속도를 앞지르는 기술발전의 눈부신 성장을 보이고 추세이며, 트랜지스터로 뿐만 아니라 투명전극으로 사용될 수 있는 가능성이 있고 투명소자, 전극의 두 가지 특성을 동시에 활용할 수 있는 매우 우수한 소재로 각광받고 있다. 다른 종류의 수 나노급 두께를 갖는 2차원 물질인 MoS_2 와 같은 소재 또한 활발히 연구 중이며 화학기상증착에 의한 합성방식의 개선을 통해 고품질화, 대량 생산화, 고성능 트랜지스터 구현 등의 많은 연구 논문들이 최근 들어 플라스틱 기판 적용 예로 제시되고 있다.

2.4 공정

플렉시블/웨어러블 디바이스를 구현하는 데에는 기존의 전기/전자소재를 합성하는 방법과 더불어 새로운 반

도체 공정 개발이 요구되었고 대표적인 방법으로 직접 인쇄기술과 전자기반 인쇄기술로 분류될 수 있다. 인쇄전자기술은 책이나 신문과 같은 인쇄물을 찍어내는 원리를 이용하여 다양한 전자소자를 제조하는 방식을 말한다. 플라스틱 같은 유연한 소재를 회전하는 롤(roll)에 감아 인쇄하는 방법을 롤투롤(roll-to-roll) 공정방식이라 이르는데, 기본적으로 필요한 전자재료를 기판에 적용하는 직접인쇄방법(direct printing)이며 공정이 단순하여 제조단가를 크게 낮출 수 있다. 이는 일반적인 인쇄공정방식을 응용한 기술로 아직 기존의 전자소자를 제작하는 방법을 대체할 만큼의 정밀도나 신뢰성이 뒷받침 되지는 않으나 반도체나 디스플레이공정들이 플렉시블 기판 기반 전자소자를 제작하는 방향으로 연구방향이 진행되면서 인쇄전자기술이 제반 기술로 자리 잡을 것으로 예상된다. 인쇄전자기술이 적용 가능한 분야는 흔히 생각하기 쉬운 플렉시블 디스플레이 뿐만 아니라 인쇄형 무선주파수인식(RFID/NFC) 태그, 다양한 종류의 센서, 태양전지 및 이차전지 같은 산업 전반에 걸쳐 존재한다. 인쇄공정에 쓰이는 공정을 살펴보면 잉크젯(ink-jet), 스프레이(spray), 그라비아(gravure), 스크린(screen), 리버스 오프셋(revers offset), 플렉소그래피(flexography) 등이 있다. 잉크젯 방식은 연속적으로 용액을 내보내는 연속(continuous) 방식과 선택적으로 용액을 내보내는 출력형(on-demand) 방식이 존재하는데 후자의 경우 전자에 비해 고해상도의 인쇄가 가능하다. 일반적으로 잉크젯 방법의 경우 $20\mu\text{m}$ 급의 해상도가 구현 가능하며 그라비아 인쇄의 경우 요철부분에 도포된 잉크 중 표면부분의 잉크를 걸어내고 홈 안쪽에 남은 잉크를 기판에 전사하는 방법이다. 홈의 깊이를 조절함으로써 전사된 잉크의 두께를 제어하기가 용이한 방법으로 현재 가장 실용적인 면에서 큰 가능성을 보이고 있다. 또한, 전기 도금과 인쇄공정의 스프레이 분사 방식을 적용하여 플렉시블 기판과 미세 범프를 결합하여 LED나 Cu 필라 구조체를 만드는 연구가 보고 된 바 있는데²⁷⁻²⁸⁾, 이는 플렉시블 기판과 소재와의 접합에 있어 다양한 분야의 접목이 가능하다는 것을 보여준다. 각 공정별로 적용 가능 해상도, 사용 잉크의 다양성, 연속공정의 가능성, 대면적화의 용이함과 같은 장단점이 존재하기 때문에 각 공정들을 개발 및 활용하는 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 전자기반 인쇄기술(transfer printing)은 희생층을 이용한 방법으로 보조 기판과 전사/인쇄하고자 하는 물질 또는 소자 사이에 선택적으로 제거가 가능한 희생층 또는 지지층을 삽입한 후 에칭용액을 통해 희생층을 제거함과 동시에 또는 일괄 제거 후 플렉시블 또는 웨어러블 기

관상 전사-인쇄하는 기술이다²⁹⁻³⁶⁾ 반도체 소자 공정 과정 중에는 본래의 기판과 전사층 사이에 강한 결합력을 유지하고 플렉시블 기판으로 전사할 경우, 화학적으로 쉽게 제거되는 희생층은 기판과 반도체 소자 사이의 결합력을 약화시킨 후 고무 스탬프(elastomeric stamp)를 이용해 전사하거나 용액 내에 부유한 전사층을 유연한 기판으로 직접 옮긴다. 앞서 언급한 SOI(silicon on insulator) 웨이퍼 공정으로 일반적인 포토리소그래피공정을 통해 패턴화된 단결정 실리콘을 HF 용액을 이용하여 희생층인 SiO₂를 제거한 다음 유연한 고분자 기판에 전사하여 기존 유기물을 이용한 플렉시블 트랜지스터보다 높은 성능을 가지는 소자를 제조할 수 있다. 희생층 물질로써 무기물질로는 일반적으로 SiO₂ 및 알루미늄, 티타늄 등이 사용되며, 적절한 식각용액만 있으면 가능하다. 단 식각용액이 다른 소재에 불필요한 식각이나 오염을 일으키지 않아야 한다. 예를 들어 HF용액 같은 경우 식각 선택성이 좋지 않아 다른 소재에 영향을 미치는 경우가 있다. 따라서, 효과적인 공정을 위해 물이나 아세톤, 톨루엔과 같은 유기용매에만 선택적으로 용해되는 폴리비닐알콜(PVA), 폴리메틸메타크릴레이트(PMMA), 폴리스티렌(PS)같은 물질이 이용된다. PS나 PMMA같은 물질은 건식 식각방법(RIE)로도 선택적 식각이 가능한데 이는 식각속도의 차이에 기인한다. 필름 구조의 희생층을 활용하는 경우에는 식각 용액이 희생층을 제거하면서 보조 기판과 전사하고자 하는 물질사이의 결합력을 약화시켜 용액 내에 부유하거나 뜰어지는 상황이 발생한다. 이는 인쇄 전사공정을 진행할 때 정렬도 조절을 통해 해결이 가능하다; 식각 공정 중 상층부를 지지해 주는 방법이 있는데 이는 기판과 전사물질간의 접착력 분배가 가능하게 하며 식각시간의 조절을 통해 잔여 희생층이 소재의 지지체 역할을 하도록 만든다. 다른 방법으로, 폴리메틸실록산(PDMS) 같은 고무 스탬프를 이용하여 소재에 직접 접촉으로 접촉시켜 원하는 기판에 전사시키는 방식이 있다. 이러한 방식은 전자 디바이스를 단순 전사가 어려운 거친 기판, 구형모양의 렌즈, 인체의 피부와 같은 복잡하고 유연한 기판으로의 전사를 가능하게 한다. 유연하고 불균일한 기판에 전사하는 경우에는 소재의 유연성을 향상시키기 위해 보통 수 마이크로 수준의 두께로 소자를 제작하게 되는데, 소자 자체의 유연성으로 인해 이를 지지해 줄 수 있는 보조 기판을 사용해야 하고 이를 전사 후 제거시키는 공정이 필요하다. 현재 사용기판의 두께, 모양에 따라 결합력을 조절하여 최적의 수율로 대면적 소자를 전사하는 여러 가지 방법이 연구되고 있다.

3. 플렉시블/웨어러블 디바이스의 응용

3.1 전자피부

현재 인체의 피부와 같은 생체 표면에 웨어러블 디바이스를 부착하여 외부의 자극이나 미세한 생체 신호를 측정하여 건강상태를 알려주는 다기능성의 전자피부 개발이 활발히 연구되고 있다. 국내의 대표적인 연구결과로 미국 스탠포드 대학의 Zhenan Bao 연구팀은 PMDS 기판위에 스프레이 코팅을 통하여 탄소나노튜브막을 형성시킨 후 두 개의 탄소나노튜브층 사이에 잘 늘어가는 고무층을 삽입하여 신축성이 뛰어난 고성능의 투명하고 휘어지는 센서를 개발하였다. 비슷한 연구결과로 서울대 서갑영 교수팀도 압력, 전단응력, 비틀림등의 미세자극을 감지할 수 있는 센서를 개발하였는데, PDMS를 기판으로 하여 미세 돌기구조를 형성, 변형률이 5% 미만인 상황에서 게이지 상수가 압력의 경우 11.5이상, 전단응력의 경우 0.75이상, 비틀림의 경우 8.53이상 나오는 디바이스를 제작하였다³⁷⁾.

3.2 디스플레이

신축성이 있는 디바이스는 일반적인 전자기기와 달리, 피부와 같이 움직이는 임의의 표면에 탈부착이 가능하다. 이러한 디바이스에 대면적의 디스플레이 및 센서 등의 소자가 결합되게 되면 전자통신과 의료분야에 활용이 가능하다. 하지만 높은 전도도를 갖는 신축성이 뛰어난 배선을 대면적으로 연결해야하는 기술적 난제가 존재하였다. 이를 해결하기 위해 최근 일본 도쿄대의 Someya 연구진은 인쇄 가능한 탄성 전도체인 단일벽 탄소나노튜브를 블록공중합체 합성 방식을 응용하여 고무 탄성체에 고르게 분산시킴으로써 이러한 문제의 해결책을 제시하였는데, 이러한 전기배선은 100S/cm의 전도도와 100% 까지 늘어나는 신축성을 보였다. 이들이 구현한 전도체 배선을 토대로 유기물 반도체와 유기 발광다이오드(OLED) 결합하여 최대 50%까지 늘어나는 디스플레이를 개발하였다³⁸⁾.

3.3 전자종이

웨어러블 디바이스를 구현하기 위해 섬유나 종이위에 전자소자를 구현하는 법이 연구되고 있다. 이러한 방법은 먼저 전기/전자 소자를 제작한 뒤 섬유나 종이 위로 전사하는 방법이 대표적이다. 섬유나 종이처럼 구겨지거나 늘어나는 기판위에서 전자 디바이스의 성능이 떨어지지 않고 유지하는 것이 관건인데 이는 소자의 재료, 배선의 디자인을 효율적으로 구성함으로써 구현 가

능하다. 그러한 소자에 활용되고 있는 물질로 탄소나노튜브, 그래핀, 나노점, 나노선등을 들 수 있다. 미국 일리노이 대학의 Rogers 교수팀은 종이, 가죽, 비닐위에서 뛰어난 성능으로 작동하는 CMOS 논리회로를 구현하여 보고하였다. 이 소자는 휘거나, 늘어나거나 구겨지는 상황에도 소자의 성능이 떨어지지 않았는데 기존의 간단한 회로나 센서 보다 더욱 진일보한 형태로 볼 수 수 있으며 전자종이 구현의 진일보된 프로토타입을 제시하였다.

3.4 헬스케어

헬스케어 분야에서 입는 형태로의 전자기기 적용은 착용하기에는 무게가 많이 나가고 구조로 인한 기능적 제약 등으로 인해 크게 활용되지는 못하고 있었다. 하지만 배터리를 비롯한 하드웨어의 소형화, 경량화 등 웨어러블 플랫폼의 발전 및 기본 전자기기와의 연동성이 크게 향상되면서 연구 분야가 매우 크게 확장되고 있다³⁹⁻⁵¹. 피트니스, 웰니스 등의 건강관리 부분 뿐 만 아니라 진단, 수술 및 치료 부문에도 확대 되고 있는데 뇌-기계 인터페이스 분야와의 융합으로 새로운 연구영역을 확장하고 있다. 뇌-기계 인터페이스 기술 또한 웨어러블 디바이스에 필요한 인터페이스들과 유사한 부분이 존재하며, 디바이스를 '입는다'는 정의에 입각하였을 때 뇌 기계 인터페이스 연구 분야는 플렉시블, 웨어러블 디바이스의 접점이 확장될 것으로 예상된다. 아직까지는 연구 초기단계에 있는 분야로서 플렉시블 소자의 제작을 통한 연구가 활발히 진행되고 있다. 2011년 미국 일리노이대의 Rogers 연구진은 질병의 진단과 치료에 활용 가능한 휘어지는 뇌-기계 인터페이스 플랫폼을 개발하였으며⁵², 초박막의 유연한 실리콘 트랜지스터 디바이스를 이용, 뇌의 특정반응에 대한 반응을 측정하였고 대뇌신피질에서 주기적으로 발생하는 발작이 특정한 전기적 파장으로 나타난다는 것을 보여주었다. 폴리이미드 기판을 이용한 디바이스 전극과 간격은 각각 300 μm , 500 μm 이며 총 360개의 채널을 제작하였다. 이동도는 $\sim 350\text{cm}^2\text{V}^{-1}$, 103 이상의 점멸비(on/off ratio)성능을 나타내었다. 그동안 헬스케어에 활용 가능한 뇌의 자극과 기록이 가능한 디바이스를 실제로 적용하는 데에는 많은 제약이 있었는데 그 이유는 수동 센서들이 뇌의 피질과 전극의 계면에서 독립적으로 연결 되어야하기 때문이었으므로 뇌의 피질과 전극의 계면에서 고해상도를 넓은 면적에서 유지하는 것이 문제점이었다. 상기 제작된 플렉시블 디바이스는 기존의 침습적인, 유연하지 않은 마이크로전극 어레이와 비교하였을 때, 시간이 경과하여도 신호의 열화가 생기지 않

으며, 뇌 조직이 손상되는 것을 최소화 할 수 있다. 또한, 개별적 센서들 간의 배선 문제를 해결하여 넓은 면적에서 고해상도의 신호 측정이 용이하다.

4. 결 론

1) 플렉시블, 웨어러블 전기소자는 다양한 연구 분야가 융합, 발전됨에 따라 산업전반에 걸쳐 요구 되고 있는 기술로서 전자종이, 전자피부, 디스플레이, 센서, 뇌-기계 인터페이스와 같은 여러 형태로 발전하고 있다.

2) 산업과 연동된 최적화된 유연기판의 연구가 선행되어야 하며, 플라스틱 소재와 직물형태의 기판을 이용한 연구들이 진행 중이며, 플렉시블 반도체소재 또한 기존의 유/무기물에서 유/무기복합소재, 탄소기반소재, 나노선 등 다양한 구조나 물질을 활용하려는 노력이 진행되고 있다.

3) 웨어러블 디바이스에 적용 가능한 전기전자소자들 또한 연구되고 있으며 박막트랜지스터, 센서 등을 이용한 선진화된 프로토타입의 개발로 산업전반에 걸쳐 적용 가능성을 보여주고 있다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

Reference

1. R. H. Reuss et al. : Macroelectronics: perspectives on technology and applications, Proc. IEEE, **93** (2005) 1239~1256
2. S. P. Lacour et al. : Stretchable interconnects for elastic electronic surfaces, Proc. IEEE, **93** (2005) 1459~1467
3. G. M. Whitesides et al. : Microsolidics: fabrication of three-dimensional metallic microstructures in Poly(dimethylsiloxane), Adv. Mater., **19** (2007) 727~733
4. T. Someya et al. : Integration of organic FETs with organic photodiodes for a large area, flexible, and lightweight sheet image scanners, IEEE Trans. Electron Devices, **52** (2005) 2502~2511
5. T. Someya et al. : Conformable, flexible, large-area networks of pressure and thermal sensors with organic transistor active matrixes, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, **102** (2005) 123211~123215
6. J. A. Rogers et al. : Paper-like electronic displays: Large-area rubberstamped plastic sheets of electronics and microencapsulated electrophoretic inks, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, **98** (2001) 4835~4840
7. S. R. Forrest. : The path to ubiquitous and low-cost

- organic electronic appliances on plastic, *Nature*, **428** (2004) 911~918
8. T.-W. Lee et al. : Organic light-emitting diodes formed by soft contact lamination, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **101** (2004) 429~433
 9. M. S. White et al. : Ultrathin, highly flexible and stretchable PLEDs, *Nat. Photon.*, **7** (2013) 811~816
 10. H. M. Lee et al. : Highly conductive aluminum textile and paper for flexible and wearable electronics, *Angew. Chem*, **125** (2013) 7872~7877
 11. J. A. Rogers et al. : Ultrathin silicon circuits with strain-isolation layers and mesh layouts for high-performance electronics on fabric, vinyl, leather, and paper, *Adv. Mater.*, **21** (2009) 3703~3707
 12. Y.-L. Yang et al. : Thick-film textile-based amperometric sensors and biosensors, *Analyst*, **135** (2010) 1230~1234
 13. J. Wang et al. : Electrochemical sensing based on printable temporary transfer tattoos, *Chem. Commun*, **48** (2012) 6794~6796
 14. M. Kaltenbrunner et al. : An ultra-lightweight design for imperceptible plastic electronics, *Nature*, **499** (2013) 458~465
 15. T. Sekitani et al. : Flexible organic transistors and circuits with extreme bending stability, *Nat. Mater.*, **9** (2010) 1015~1022
 16. A. Javey et al. : User-interactive electronic skin for instantaneous pressure visualization, *Nat. Mater.*, **12** (2013) 899~904
 17. Z. Bao et al. : Light-emitting electronic skin, *Nat. Photonics*, **7** (2013) 769~771
 18. S.-I. Park et al. : Printed assemblies of inorganic light-emitting diodes for deformable and semitransparent displays, *Science*, **325** (2009) 977~981
 19. T.-I. Kim et al. : Injectable, cellular-scale optoelectronics with applications for wireless optogenetics, *Science*, **340** (2013) 211~216
 20. K. Suzuki et al. : Substitutional reality system: a novel experimental platform for experiencing alternative reality, *Sci. Rep.*, **2:459** (2012) 1~9
 21. L. M. Castano et al. : Smart fabric sensors and e-textile technologies: a review, *Smart Mater. Struct.* **23** (2014) 053001~053027
 22. D.-H. Kim et al. : Epidermal Electronics, *Science*, **333** (2011) 838~843
 23. Z. Bao et al. : Skin-like pressure and strain sensors based on transparent elastic films of carbon nanotubes, *Nat. Nanotechnol.*, **6** (2012) 788~792
 24. C.-W. Lee et al. : Fabrication and reliability test of device embedded flexible module, *Journal of KWJS*, **31** (2013) 84~88 (in Korean)
 25. J. A. Rogers et al. : Multifunctional epidermal electronics printed directly onto the skin, *Adv. Mater.*, **25** (2013) 2773~2778
 26. Z. Bao et al. : A review of fabrication and applications of carbon nanotube film-based flexible electronics, *Nanoscale*, **5** (2013) 1727~1752
 27. S. W. Hong et al. : Solderable and electro-platable flexible electronic circuit on a porous stretchable elastomer, *Nat. Commun.*, **3** (2012) 1~8
 28. C.-W. Lee et al. : Study on joint of micro solder bump for application of flexible electronics, *Journal of KWJS*, **31** (2013) 4~10 (in Korean)
 29. J. A. Rogers et al. : Electronically programmable, reversible shape change in two- and three-dimensional hydrogel structures, *Adv. Mater*, **25** (2013) 1541~1546
 30. J. A. Rogers et al. : Digital cameras with designs inspired by the arthropod eye, *Nature*, **497** (2013) 95~99
 31. S. Bauer et al. : Ultrathin and lightweight organic solar cells with high flexibility, *Nat. Commun*, **3:770** (2012) 1~7
 32. L. Hu et al. : Stretchable, porous, and conductive energy textiles, *Nano Lett*, **10** (2010) 708~714
 33. J. A. Rogers et al. : Dynamically tunable hemispherical electronic eye camera system with adjustable zoom capability, *Proc. Natl. Acad. Sci USA*, **108** (2011) 1788~1793
 34. J. A. Rogers et al. : Stretchable GaAs photovoltaics with designs that enable high areal coverage, *Adv. Mater.*, **23** (2011) 986~991
 35. D. S. Gray et al. : High-conductivity elastomeric electronics, *Adv. Mater.*, **16** (2004) 393~397
 36. D. Brosteaux et al. : Design and fabrication of elastic interconnections for stretchable electronic circuits, *IEEE Electron Dev. Lett*, **28** (2007) 552~554
 37. K.-Y. Suh et al. : A flexible and highly sensitive strain-gauge sensor using reversible interlocking of nanofibres, *Nat. Mater.*, **11** (2012) 795~801
 38. T. Someya et al. : Stretchable active-matrix organic light-emitting diode display using printable elastic conductors, *Nat. Mater.*, **8** (2009) 494~499
 39. M. Rodgers et al. : A review of wearable sensors and systems with application in rehabilitation, *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **9:21** (2012) 1~17
 40. P. A. Muennig et al. : What changes in survival rates tell us about US health care. *Health Affairs*, **29** (2010) 2105~2113
 41. S. P. Gulley et al. : If we build it, who will come? Working-age adults with chronic health care needs and the medical home. *Medical Care*, **49** (2011) 149~155
 42. S. P. Gulley et al. : Ongoing coverage for ongoing care: access, utilization, and out-of-pocket spending among uninsured working-aged adults with chronic health care needs. *Am. J. Public Health*, **101** (2011) 368~375
 43. X.-F. Teng et al. : Wearable medical systems for

- p-Health. IEEE Reviews in Biomedical Engineering, **1** (2008) 62~74
44. P. Bonato et al. : Wearable sensors and systems. From enabling technology to clinical applications. IEEE Eng Med Biol Mag, **29** (2010) 25~36
45. O. Brand et al. : Microsensor integration into systems-on-chip. Proceedings of the IEEE, **94** (2006) 1160~1176
46. H. H. Asada et al. : Mobile monitoring with wearable photoplethysmographic biosensors. IEEE Eng. Med. Biol. Mag., **22** (2003) 28~40
47. P. Corbishley et al. : Towards a miniaturized, wearable, battery-operated monitoring system. IEEE Trans. Biomed. Eng., **55** (2008)196~204
48. C. H. Ahn et al. : Disposable smart lab on a chip for point-of-care clinical diagnostics. Proc. IEEE, **92** (2004) 154~173
49. M. N. Nyan et al. : A wearable system for pre-impact fall detection. J. Biomech., **41** (2008) 3475~3481
50. P. Bonato : Wearable sensors/systems and their impact on biomedical engineering. IEEE Eng. Med Biol. Mag., **22** (2003) 18~20
51. X. Hu et al. : Stretchable inorganic- semiconductor electronic systems, Adv. Mater., **23** (2011) 2933~2936
52. D.-H. Kim et al. : Flexible, foldable, actively multiplexed, high-density electrode array for mapping brain activity in vivo. Nat. Neuroscience, **14** (2011) 1599~1607



- 강석희
- 1987년생, 공학사
- 부산대학교 석사과정
- 탄소기반 전자소자, 고분자 자기조립
- e-mail : shkang2443@gmail.com



- 홍석원
- 1974년생, 공학박사
- 부산대학교 조교수
- 탄소기반 전자소자, 고분자 자기조립
- e-mail : swhong@pusan.ac.kr