

천연 셀룰로오스를 이용한 MEMS 기술

김 재 환 · 인하대학교 기계공학과, 교수

e-mail : jaehwan@inha.ac.kr

이 글에서는 천연재료인 셀룰로오스를 이용한 MEMS 기술의 가능성과 이의 응용에 대해 소개하고자 한다.

MEMS나 지능재료 시스템 기술은 학제적인 분야로서 최근에 화학, 기계, 전기, 의학, 재료 그리고 식품 등의 다양한 집단의 관심을 모으고 있다. 지능재료 시스템은 주위환경의 변화를 감지하고 재료의 성질이나 형상 또는 기계적 전기적 응답을 변화시켜서 이 변화에 대응하는 거동을 하는 디바이스를 일컫는다. 이러한 영역에 속하는 재료에는 광학적으로 작동 가능한 폴리머나 다기능 폴리머, 탄소 나노튜브, 압전 또는 다른 능동 세라믹 등이 있다. 센서와 작동기 그리고 신호처리와 제어를 위한 전기회로를 가지는 MEMS의

제작은 반도체 산업에 근간을 둔 마이크로 제작기술의 발전에 의해 최근 크게 발전하게 되었다. 실리콘을 주요 재료로 가공하는 벌크 마이크로 머시닝, 표면 마이크로 머시닝과 같은 마이크로 제작기술은 현재 MEMS를 위하여 사용되고 있다. 이러한 기술에서 사용된 실리콘 재료는 적절한 기계적 전기적 특성을 갖고 있으며 특히 전기회로를 바로 실리콘 웨이퍼에 제조할 수 있으므로 센서/액추에이터와 통합이 매우 용이하다. 그러나 실리콘은 다른 재료와 호환성이 적으며 인체에 삽입되었을 때 해를 주며 가공 시설이 매우 비싸다. 반면에, 고분자

재료는 주조가 가능하고, 유연하며, 박막형태의 필름으로 생성이 매우 쉽고, 반도체/도체의 성질을 만들 수 있으며, 분자구조의 폭넓은 선택이 가능하여 압전 또는 전왜현상을 가질 수 있어서 MEMS의 새로운 재료로 부각되고 있다. 그럼에도 불구하고 고분자가 MEMS에 많이 활용되지 못한 이유는 미세가공이 어렵고 기계적인 성질이 약하며 MEMS에서 사용되는 대부분의 고분자가 인체에 호환성이 적기 때문이다.

한편, 셀룰로오스는 나무나 식물에서 얻어지는 천연재료로서 이를 가지고 만든 셀룰로오스 종이는 다른 반도체 재료나 나노재

생체모방 종이작동기는 마이크로파를 이용한 원격구동 기술을 접목하여 배터리가 없이 원격구동을 함으로써 초경량 마이크로 로봇과 같은 것을 만들 수 있다.

셀룰로오스 EAPap

EAPap은 셀룰로오스 종이를 가지고 만든 작동기로서, 큰 변형을 내고, 가볍고, 유연하고, 건조하고, 낮은 작동전압, 적은 전력소모의 특징을 가지므로 많은 장점이 있다. 지금까지 셀룰로오스 종이를 이용한 EAPap은 $0.25V/\mu m$ 의 낮은 전압에도 작동을 하고, 소모 전력이 $\sim 10mW/cm^2$ 로 낮고, 길이대비 약 10%의 굽힘변형이 나오며, 수십 Hz까지 작동이 가능한 것을 확인하였다. 더욱이 EAPap은 수분을 특별히 공급하지 않고도 건조한 상태에서 몇 시간 동안 동작하는 특징이 있다. 이러한 특징은 초경량 소형 디바이스에 응용하기에 적합하다. 따라서 셀룰로오스로 EAPap 작동기를 만든다면 유연하고 썩어 없어질 수 있어 자연친화적이며 가

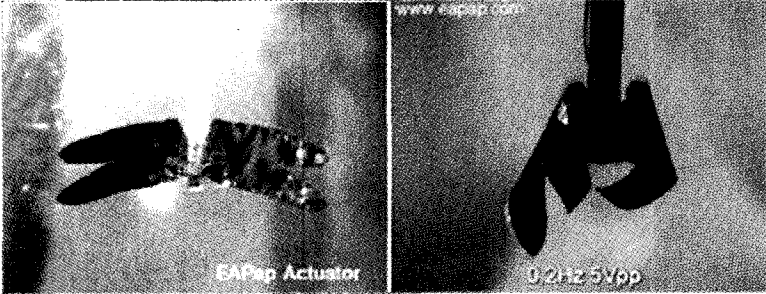


그림 1 생체모방 종이작동기를 이용한 잡자리 날개

료들과 다르게 인체에 무해하고 자연에서 소멸되는 자연친화적인 특징이 있다. 본 연구단에서는 셀룰로오스를 주성분으로 하는 종이에서 전기장에 의해 변위가 발생하는 것을 발견하고 이를 생체모방 종이작동기(Electroactive paper; EAPap)라고 하였다.

EAPap은 작동기(actuator)뿐만 아니라 센서로도 쓰일 수 있는 천연 지능재료이다. 이 글에서는 셀룰로오스 EAPap를 가지고 MEMS를 만드는 기술의 가능성을 이야기하고 그 응용분야에 대해서 소개하고자 한다.

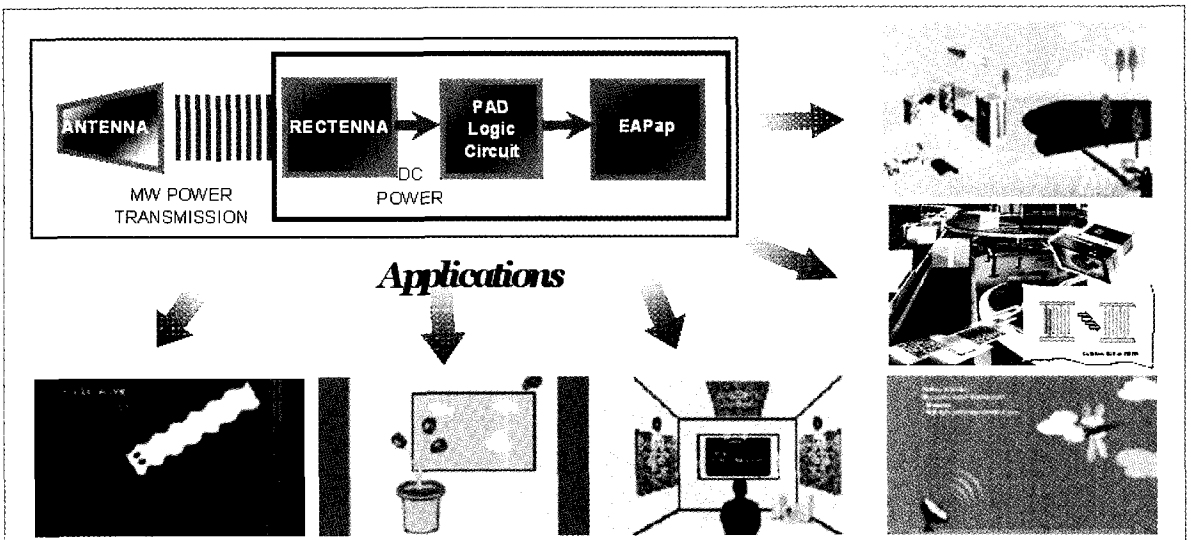


그림 2 마이크로파로 구동되는 생체모방 종이작동기의 응용

격이 싼 디바이스를 만들 수 있다. 특히 초소형 벌레로봇, 초소형 비행체, 오락산업의 기구들과 같이 초경량, 대변위가 요구되는 응용분야에서는 원격구동을 함으로써 소모전원을 탑재하지 않고 활동범위를 넓힐 수 있는 초경량 전기작동 고분자 작동기가 필수적인데, EAPap을 마이크로파 원격구동 장치와 통합하면 이러한 원격구동 생체모방 작동기의 구현이 가능하다.

초경량 생체모방 종이작동기를 구동하기 위해서는 작동기에 배터리를 갖고 다니게 할 수 없고 원격으로 구동하는 것이 이상적이다. 이러한 구동기술은 최근 미국, 일본에서 시도되고 있는 기술로서 적외선, 레이저, 마이크로파 등을 이용한 원격구동기술이 보고되고 있다. 본 연구단에서는 마이크로파를 이용한 원격구동기술을 미국항공우주국과 협동으로 개발하고 있다. 그림 2는 마이크로파 원격구동기술의 개념을 나타낸 것이다. 마이크로파가 렉테나(rectenna, rectifying antenna)에 닿으면 마이크로파의 전력은 직류로 바뀌게 되고 필요에 따라 이 전력을 PAD(Power Allocation Device)를 이용하여 배분하게 되면 작동기의 움직임을 원하는 대로 만들 수 있다. 마이크로 패터닝 기술을 이용하면 생체모방 종이작동기의 전극 위에 렉테나 패턴을 바로 제작하여서 렉테나와 EAPap을 일체로 만들 수 있다.

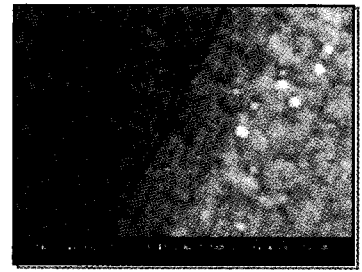
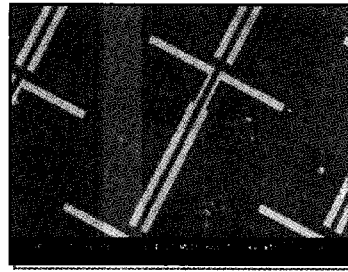


그림 3 셀룰로오스 위에 제작한 렉테나 마이크로 패턴. 왼쪽 그림은 렉테나 패턴 에레이를 나타낸 것이고 오른쪽 그림은 안테나 일부를 확대하여 나노미터 수준의 끝 부분을 나타낸 것이다.

셀룰로오스 종이에 마이크로 전극패턴 제조

생체모방 종이작동기 제작 기술은 셀룰로오스 종이의 제조와 이 종이에 전극 및 렉테나 형상을 제작하는 마이크로 패터닝 기술이 연계되는데, 이러한 EAPap의 제작기술은 셀룰로오스를 가지고 MEMS를 만들 수 있는 가능성이 있다. 종이 위에 전극의 마이크로 패턴을 만드는 것은 에칭문제로 인해 일반적인 반도체 공정으로는 어렵다. 따라서 마이크로 접촉 인쇄(micro contact printing) 기법을 이용하여 마스탬프를 찍듯이 마이크로 패턴을 제작하는 연구를 하고 있다. 전형적인 마이크로 제작기술을 이용하여 PDMS 또는 PUA 몰드 스탬프를 만든 후 금박막을 입히고 나서 셀룰로오스 종이에 누르면 접촉되는 면의 금박막이 셀룰로오스 종이에 옮겨지게 된다. 이때, 스탬프 표면과 금박막 사이의 접착력보다 금박막과 셀룰로오스 종이 면과의 접착력이 더 커야

효과적으로 금박막이 셀룰로오스 종으로 전사되는데 이를 위하여 셀룰로오스 표면에 단일층의 접착층을 도포한다. 그림 3은 셀룰로오스 종이 위에 렉테나의 전극 형태를 마이크로 접촉 인쇄 기법을 이용하여 금으로 만든 예이다. 렉테나의 크기는 마이크로파 주파수에 반비례하는데 예를 들어 10GHz 대에서 그림 3과 같은 다이폴형 렉테나의 길이는 약 15mm이며 100GHz에서는 약 1.5mm이다. 이 때 선폭은 약 70 μ m으로서 일반적인 방법으로는 제조가 쉽지 않다.

셀룰로오스 종이에 유연 전자소자 제조

생체모방 종이작동기 제작 기술은 마이크로파를 이용하여 종이 로봇의 원격구동을 위한 렉테나 제조기술을 필요로 하는데, 렉테나를 종이 위에 제조하려면 마이크로 전극패턴 제조와 Schottky 다이오드 제조가 셀룰로오스 종이 위에 가능해야 한다.

Schottky 다이오드 제조 기술은 곧바로 유연전자소자 제조 기술과 연결이 된다. P-N 다이오드와 비교하여 Schottky 다이오드의 가장 큰 다른 점은 역회복 시간이 100ns이나 그 이하로 P-N 다이오드와는 비교할 수 없을 정도로 매우 빠르다는 점이다. 이러한 이유로 인해 Schottky 다이오드는 빠른 파장을 요구하는 UHF대 검파, 믹서 등의 핵심 요소로 쓰이고 있다. 여기에서 반도체의 재료로는 실리콘이나 갈륨비소 등이 쓰이고, Schottky 장벽의 금속으로는 몰리브덴, 텅스텐, 백금, 금, 크롬 등이 적당하다.

셀룰로오스 종이는 쉽게 물을 흡수하고 환경에 따른 변화가 있기 때문에 지금까지 잘 갖추어진 반도체 기술을 적용하기 어렵다. 이러한 문제점들을 극복하기 위해 기존에 사용하던 리소그래피 기술을 사용하지 않고 새로운 기술을 적용할 수밖에 없었다. 예를 들면 마이크로 접촉 인쇄 기술이나 리프트 오프(lift off) 기술을 적용하여 높은 질의 금으로 된 마이크로파 안테나를 성공적으로 종이 위에 제작하였다. 이 마이크로파 안테나에 Schottky 다이오드를 제작하기 위해 PEDOT:PSS를 반도체로 사용하였고, 옴 접촉 전극으로는 Al을 사용하였으며, Schottky 장벽 전극으로는 금을 사용하였다. 그림 4는 이렇게 제작된 3개 층의 Schottky의 단면(좌측)과 이 Schottky 다이오드로부터 얻어진 I-V 곡선(우측)이

다. 이러한 기술 개발로 인해 종이로 제작된 액츄에이터나 마이크로 로봇이 머지않아 전선 없이 구동 될 수 있을 것이다.

셀룰로오스 마이크로 패턴 제작 기술

최근 10여 년간 평판 디스플레이는 급성장을 거듭하며 40여 년 동안 디스플레이의 대명사처럼 여겨져 왔던 브라운관을 이용한 디스플레이를 급속도로 교체해 나가고 있다. 평판 디스플레이는 휴대가 편리하도록 가볍고, 박형이며, 낮은 소비전력으로 인해 휴대용 기기의 대부분이 이미 대체되었다. 하지만 2000년대에 들어서면서 E-ink 사의 마이크로 캡슐 전기영동 디스플레이와 Lucent Technology 사의 유기 트랜지스터(Organic Thin Film Transistor; OTFT)를 결합하여 만든 전자 종이 개발됨으로써 가볍고, 얇고, 자유로이 구부릴 수 있는 새로운 전자종이 시대의 개막을 예고했다. 평판 디스플레

이는 기존에 있던 브라운관을 대체하는 효과와, 휴대용 기기로서의 시장 확장효과가 있었던 것에 비해 전자종이는 기존의 평판 디스플레이는 물론, 전자 신문, 전자 잡지, 전자 책, 옥내 및 옥외용 광고판과 게시판, 핸드폰 등 무한한 시장확장 효과가 기대된다.

전자종이의 작동원리는 크게 반은 흑색 반은 백색을 갖은 불을 이용하여 전기장에 의해 흑색과 백색을 구현하는 Gyricon 디스플레이 방식과, 색을 갖는 미립자를 유체 속에 분산시켜 전기장에 의해 미립자의 움직임으로 이미지를 나타내는 전기 영동법(electrophoretic)으로 구분할 수 있다. 후자의 경우 전자 종이의 구성요소는 200~300m의 투명한 마이크로 캡슐과, 색을 구현할 수 있고 이 캡슐에 채워질 전자 잉크, 그리고 캡슐 안의 입자를 움직일 수 있도록 할 수 있는 상하의 투명한 전극과, 색을 선택적으로 나타낼 수 있도록 하려면 자유자제로 구부릴 수 있는 유기 트랜지스터(OTFT)가 필요

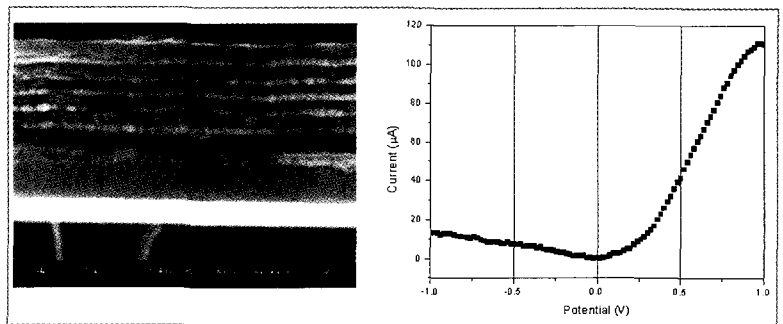


그림 4 셀룰로오스 위에 제작된 3개 층(AI/PEDOT:PSS/Au)으로 이루어진 Schottky 다이오드(왼쪽). AI/PEDOT:PSS 접촉은 옴 접촉으로 사용되었고 PEDOT:PSS/Au는 Schottky 장벽으로 사용되었다. 이 다이오드를 통해 얻은 I-V특성(오른쪽)

하다. 현재 상업화가 진행 중인 기술로는 전자 잉크를 이용한 반사형 디스플레이지만 미래에는 OLED(Organic Light Emitting Diode)를 이용한 기술이 전자 잉크를 대체할 것으로 전망된다.

이러한 미래 산업을 주도할 전자종이의 기판으로는 플라스틱, 금속, 종이 등이 쓰일 수 있다. 현재 시장을 주도하고 있는 평판 디스플레이에서는 투명한 전도성 산화막(ITO)이 코팅된 유리판을 사용하며 고부가가치의 주요 부품으로 다루어지고 있다. 이에 비해 전자종이의 경우 기판은 이 디스플레이 구성 재료의 대부분을 차지한다. 이의 후보로는 플라스틱, 금속 등이 사용될 수 있으나 이들 재료들은 사용 후 산업 폐기물로 환경을 오염시키는 재료들이다. 이러한 문제점들을 해결하고 낮은 가격과 친환경적인 재료 개발이 절실하다. 셀룰로오스는 이러한 문제점들을 해결할 수 있는 가장 적합한 재료 중 하나이다.

셀룰로오스는 석유 부산물이 아니고, 고갈되지 않는 무한히 재

생 가능한 재료이고, 자연에서 쉽게 얻을 수 있고, 싸다는 장점을 가지고 있다. 이는 또한 제작 방법에 따라 투명도가 유리나 유사할 정도로 투명한 필름을 얻을 수 있다. 우선 마이크로 패턴을 만들기 위해서 리소그래피 공법을 이용하여 원하는 크기와 깊이의 광경화성수지를 이용하여 패턴을 만든 후, 준비된 액상의 셀룰로오스를 제작된 패턴에 부어 회전을 주게 되면 용매가 제거되면서 고화되어 일정한 두께의 셀룰로오스 필름이 형성된다. 이러한 필름을 패턴에서 떼어 내면 광경화성수지 패턴의 정확한 역 이미지의 셀룰로오스 패턴이 얻어진다. 전자종이로 사용되는 패턴의 깊이는 약 10 μ m 정도의 패턴을 사용한다. 그림 5의 왼쪽 그림은 벌집 형의 셀룰로오스 패턴을 위에서 내려다본 전자현미경 사진이고 오른쪽 사진은 사각형 셀룰로오스 패턴의 단면을 나타낸 그림이다. 패턴의 깊이는 약 14 μ m이다. 이러한 셀룰로오스 패턴뿐만 아니라 셀룰로오스 패턴에 ITO 전극 제작을 현재 진행

중이다. 또한 반사 형 전자종이의 다음 세대로 주목 받고 있는 OLED를 접목한 전자종이 개발도 진행하고자 한다.

셀룰로오스에 압전효과가 있는 것을 최초로 발견하여 미래의 종이 마이크로 로봇 개발을 위한 연구를 진행 중이며, 더욱이 셀룰로오스의 다양한 치환기를 이용하면 다양한 성능의 셀룰로오스를 만들 수 있는 점을 착안하여 환경오염 물질인 고분자 제품들을 저렴하고 친환경적 셀룰로오스 제품으로 교체하고자 다양한 연구를 진행 중이다.

마침글

공해를 일으키지 않고 인체에 해를 주지 않는 천연재료인 셀룰로오스를 MEMS에 사용될 수 있는 새로운 지능재료로 개발함으로써 센서, 액추에이터, 생체모방 로봇뿐만 아니라 유연 전자 디스플레이, RFID 등 우리가 예상하지 못했던 기술들이 새롭게 개발될 수 있는 가능성이 열리게 되었다. 이러한 연구는 현재의 기술들 사이에 놓인 블루 오션 연구 분야로서 많은 기회가 있다. 뿐만 아니라 화학, 고분자, 재료 및 전자가 융합된 학제적인 연구 분야이므로 쉽지 않은 도전이 기다리고 있다. 이러한 도전은 개척정신과 긴밀한 학제적인 공동연구로서 극복할 수 있을 것이다.

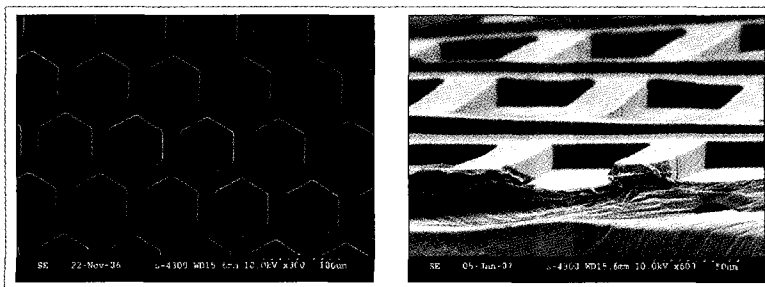


그림 5 셀룰로오스로 제작된 육각형 패턴을 위에서 내려다본 그림(왼쪽)과 사각형 패턴의 단면 그림(오른쪽)