

생체모방 작동기

이 글에서는 전기작동고분자, 압전재료와 같은 지능재료의 변형을 이용한 생체모방 작동기 기술과 이의 응용에 대해 소개하고자 한다.

과학자들은 전기적 자극이 가해졌을 때 길이나 부피가 늘거나 줄어드는 경량재료의 개발을 추구하여왔다. 이러한 물질은 운동을 일으키는 작동기(actuator)로 사용되어 초소형 응용분야에 사용하기에는 너무 무겁거나 큰 전기모터나 공압 실린더를 대체할 수 있다. 뿐만 아니라, 이러한 재료는 모터나 공압 실린더의 회전, 직선 운동을 원하는 운동으로 바꾸기 위한 운동변환기가 필요하지 않으므로 많은 장점을 갖고 있다. 과거 10여 년간 EAP(Electro-Active Polymer) 분야는 큰 변형을 낼 수 있는 지능재료가 출현함에 따라

인공근육과 같은 생체모방 작동기를 만들 수 있는 가능성으로 인해 많은 관심이 모아지고 있다. EAP는 외부의 자극에 따라 큰 변위를 생성할 뿐만 아니라 근육과 같이 탄력성이 있는, 다른 재료기술들이 낼 수 없는 특성과 성능을 가지고 있다. EAP가 생체근육과 같은 생체모방 작동기가 될 수 있는 가능성은 곧 공상과학의 꿈을 이루고자 하는 희망을 갖게 하며 인류의 문명발전에 크게 기여할 것이다. 이러한 작동기는 차세대 마이크로로봇, 오락산업 또는 초소형 비행체의 구동과 같은

생체모방 작동기의 새로운 응용분야를 창출하고 있다. 생체모방 작동기의 응용성은 폭넓으며 새로운 기술혁신의 기대를 불러 일으키고 있다.

전기작동고분자 시연을 위한 장치



로봇인간의 안면표정(JPL사진) 데이빗 한센 작품, 달라스 텍사스대

그림 1 안면 표정 로봇

생체 모방 작동기의 주요 재료인 EAP는 전기장에 의해 작동되는 것과 이온에 의해 작동하는 것으로 대별되며 전기장에 의한 EAP에는 압전, 전왜, 강유전성의 재료가 있다. 이온화에 의한 것은 외부에서 전기와 같은 자극이 가해졌을 때 폴리머 내부에 이온의 편류가 발생하여 변형이 발생하는 것으로 폴리머, 젤, IPMC(Ionic Polymer Metal Composite), 탄소나노튜브, 도전성 폴리머 그리고 ER유체가 있다. 이외에는 종이, 천 등의 다양한 EAP가 현재 연구되고 있다.

전기장에 의한 EAP

펜실베니아 주립대학에서는 P(VDF-TrFE)에 전자 방사를 시킴으로써 괄목할 만한 전왜현상을 얻을 수 있음을 발견하였다. 그 결과 바이모프 형태의 작동기로 만들었을 때 5% 이상의 변형을 얻을 수 있고 1GPa 이상의 탄성 계수를 가지고 있으며 높은 주파수까지도 작동이 가능하다. 이 재료는 높은 전압을 가해야 하는 단점이 있는데 최근에는 높은 유전율을 갖는 유기물을 첨가하여 인가전압을 낮추는 연구를 하고 있다. SRI International에서는 지난 10여 년 간 유연 전극이 입혀진 탄성중합체의 전기장 인가에 따른 응답에 기인한 Electro-

strictive Polymer Artificial Muscle(EPAM)을 연구하고 있다. 작동원리는 두 개의 유연 전극 사이에 탄성 중합체를 적층시키고 상하의 두 전극 사이에 전위차를 걸어 주면 폴리머는 두께 방향으로 늘리면서 평면 방향으로 늘어난다. 이 변형은 전기장의 자유전하로 인한 정전기력에 기인한 것으로 알려져 있다. 최근에는 3M사에서 제작하는 아크릴 탄성 중합체를 사용했을 때 양방향 대칭의 제한 하에서 300% 이상의 평면 변형을 일으킴을 발견하였다. 아크릴 EPAM을 사용하여 음향 스피커나 소음제어를 위한 음원, 그리고 군화의 전원발생장치의 개발을 연구하고 있다. 또한 아크릴 박막을 스프링과 조합하여 감아서 만든 다기능 작동기(Multifunctional Electro-elastomer Roll, MER Actuator)는 직선 운동뿐만 아니라 굽힘운동을 일으킬 수 있어서 신호에 따라 3차원의 운동을 할 수 있다. 이를 이용하여 6축 보행로봇을 만들기도 하였다. 국내의 성균관대학에서는 우레탄계 탄성중합체를 이용하여 인치웜로봇과 맹인을 위한 점자 표시기를 개발하기도 하였다.

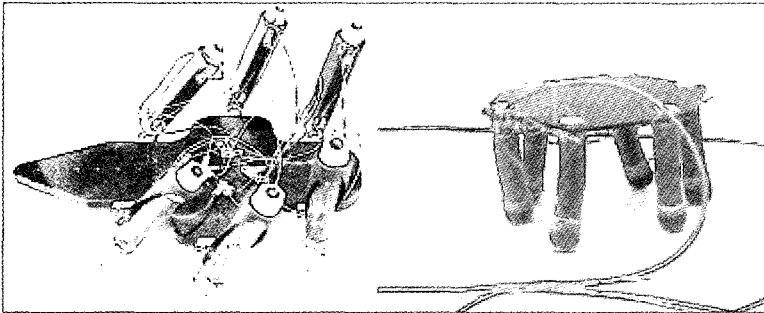


그림 2 MER 작동기를 이용한 Skitter(SRI)



그림 3 우레탄 탄성중합체를 이용한 인치웜 및 점자 표시기(성균관대)

이온 전기작동고분자 재료

이온 폴리머 젤에 대한 연구는 아리조나 대학의 Calvert, 비이온 폴리머젤은 일본 신슈대학의

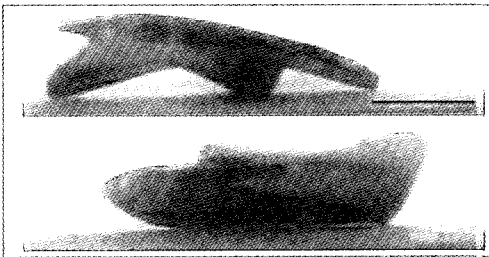


그림 4 이온젤을 이용한 불가사리(동경대)

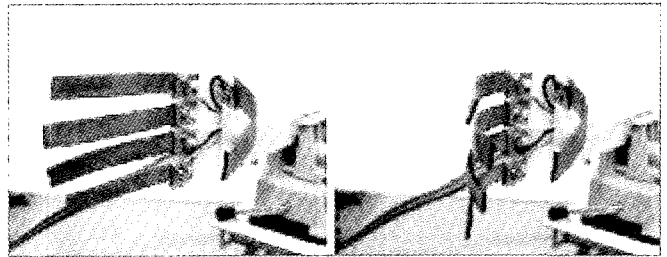


그림 5 IPMC를 이용한 손

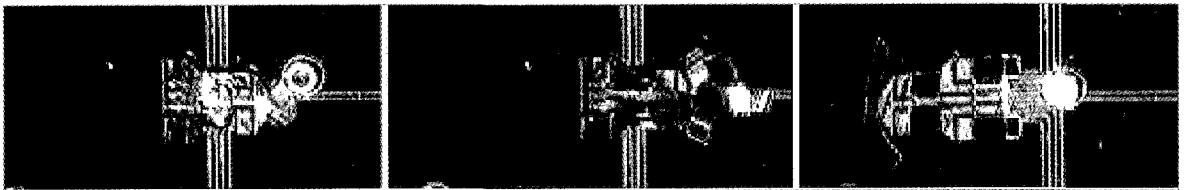


그림 6 도전성 폴리머를 이용한 MEMS형 초소형 로봇 암 : 100 μ m 유리구슬을 250 μ m 옮기고 있다.(Linkopings 대학)

Hirai, 동경대학의 Inoue 교수팀을 비롯하여 헝가리 부다페스트 대학에서는 자기장에 의해서 작동하는 페로젤(ferrogel)을 연구, 개발하고 있다. 이러한 고분자 젤은 기어 다니는 곤충과 같은 로봇을 만드는 데 쓰일 수 있다. IPMC(Ionic Polymer Metal Composite)는 가장 일반적으로 알려진 전기작동고분자로서, 낮은 전기장이 인가되었을 때에는 큰 굽힘 변형을 내며 현재 주로 사용되는 것으로는 기본 폴리머 Nafion에 금속성 전극이 입혀진 perfluorinated IPMC이다. 미국 JPL과 뉴멕시코 대학에서는 화성 탐사선의 시료채취용 그리퍼, 와이퍼 등을 IPMC를 이용하여 만들었으며 일본에서는 능동 내시경, 무소음 수영로봇, 산호초와 유사한 섬모, 조립형 로봇, 날개를 저어서 날아가는 기구 등에 응용하는 노력을 경주하고 있다.

IPMC는 내구성이 좋고 수분 속에서 사용할 수 있으며 센서로서의 역할도 하므로 다양한 응용이 가능하다. 미국의 리노 대학과 국내 건국대학교에서 이와 관련된 많은 연구를 하고 있다.

도전성 폴리머는 지능 재료 시스템에 요구되는 성질들을 갖고 있으므로 새로운 기능성 재료로서 각광 받고 있다. 도전성 폴리머에서는 polypyrrole(PPy), polyaniline(PANi) 그리고 Polythiophene(PTh) 등 세 종류가 주로 지능재료로 이용되고 있다. 도전성 폴리머를 이용한 3층 구조의 작동기는 호주 Wollongong 대학, 스페인, 미국의 MIT, JPL 등 여러 곳에서 성공적으로 만들었으며, 스웨덴 Linkopings 대학에서는 도전성 폴리머 작동기를 이용하여 개별적으로 제어할 수 있는 팔굽치, 팔목 및 2~4개의 손가락을 가진 로봇 암을 만들었다.

Single-Walled carbon NanoTube(SWNT)를 이용한 작동기는 자연 근육보다 높은 응력을 생성하며, 높은 탄성계수를 갖는 강유전체보다 높은 변형을 발생시킨다. 자연근육과 같이 거시적인 SWNT작동기는 수십억 개의 개별 나노튜브 작동기가 조합된 형태로써, 작동기의 수명을 단축시키는 이온교환이 불필요한 작동기구를 가지므로 긴 수명을 유지할 수 있다. 낮은 전압에서도 동작하는 나노튜브 작동기는 인공 근육으로 개발되고 있다. 소금물에 탄소나노튜브의 bucky paper를 넣고 +1V 또는 -1V를 인가하였을 때 작동하는 것을 독일의 Max-Flank 연구소 및 미국의 Allied Signal에서 공동으로 확인하였다. 이때 약 1%의 변형률이 나왔으며 bucky paper의 종탄성계수가 수 GPa이므로 1Tera Pa를 넘는 개별적인 탄소

나노튜브보다는 장점이 있다. 탄소나노튜브를 폴리머와 혼합하면 기계적 성질과 전기적 성질을 개선하여 기능성 복합재료(smart skin) 및 인공근육을 만들 수 있는데 이에 대한 연구가 주목을 받고 있다.

종이를 이용한 생체모방 작동기를 국내 인하대대학에서 연구하고 있다. 셀룰로오스를 주성분으로 하는 종이에서 전기장에 의해 변위가 발생하는 것을 발견하고 이를 생체모방 종이(Electroactive paper, EAPap)라고 하였다.

생체모방 종이 작동기

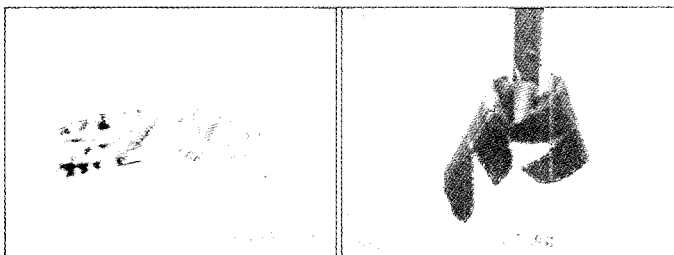
EAPap 작동기는 셀룰로오스 종이를 가지고 만든 작동기로서, 큰 변형을 내고, 가볍고, 유연하고, 건조하고, 낮은 작동전압, 적은 전력소모 등의 특징을 가지므로 많은 장점이 있다. 특히 셀룰로오스는 식물과 나무에서 쉽게 얻을 수 있는 천연재료로서 이를 가지고 만든 셀룰로오스 종이는 다른 반도체 재료나 나노재료들과 다르게 인체에 무해하고 자연에서

소멸되는 자연친화적인 특징이 있다. 지금까지 셀룰로오스 종이를 이용한 EAPap은 0.25V/ μm 의 낮은 전압에도 작동을 하고, 소모전력이 $\sim 10\text{mW}/\text{cm}^2$ 로 낮고, 길이 대비 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 응용하기 위한 현재 EAP 재료의 한계를 극복할 수 있는 것으로 기대되고 있다. 따라서, 셀룰로오스 종이를 가지고 EAPap 작동기를 만든다면 유연하고 썩어 없어질 수 있어 자연친화적이며 가격이 싼 디바이스를 만들 수 있다. 특히 초소형 벌레로봇, 초소형 비행체, 오락산업의 기구들과 같이 초경량, 대변위가 요구되는 인공근육 응용분야에서는 원격구동을 함으로써 소모전원을 탑재하지 않고 활동범위를 넓힐 수 있는 초경량 전기작동고분자 작동기가 필수적인데, 전기작동종이작동기를 마이크로파 원격구동장치를 통함

화하면 이러한 원격구동 생체모방 작동기의 구현이 가능하다.

셀룰로오스 종이의 제조는 셀룰로오스 섬유를 다양한 용제를 사용하여 녹여서 종이를 뽑아내는 방법과 박테리아를 이용하여 셀룰로오스를 성장시키면서 제조하는 방법, electro spinning에 의한 제조방법, 그리고 셀룰로오스 섬유를 적층하여 복합재료 제작하는 방법이 있을 수 있는데, 현재는 용제를 사용한 방법을 주로 사용하고 있다. 셀룰로오스 용액은 압출이나 코팅 방법을 사용하여 시트로 제작하고 있다. EAPap의 성능은 변위, 최대 힘, 소모전력을 주파수, 인가전압, 온도 및 습도에 따라 평가한다. 이를 위하여 온습도가 조절되는 환경챔버 안에 작동기를 설치하고 레이저 센서와 힘센서로 성능을 측정한다. 한편, EAPap은 아직은 작동력이 작고 습도에 민감한 단점이 있는데, 이를 개선하기 위하여 EAPap 두께를 최적화하는 것과 전도성 고분자 및 탄소나노튜브를 코팅하거나 셀룰로오스와 섞는 것, 그리고 셀룰로오스 용액에 화학 첨가물을 사용하는 연구를 병행하고 있다. 그 결과 작동변위, 작동력 및 습도의 내구성이 향상된 EAPap의 성능을 얻고 있다.

EAPap의 작동원리는 전기장을 가했을 때 셀룰로오스 내에 있는 이온, 자유수, 미량의 금속이온들 중에 어떤 것이 이동을 하면서 굽힘변형이 생기는 일종의 이온전이



(a) 셀룰로오스 EAPap 작동기 (b) 전도성고분자 코팅 EAPap 작동기

그림 7 생체모방 종이작동기를 이용한 잡자리 날개

효과(ion migration effect)인 것으로 인식되었다. 그 이유는 종이 는 일반적으로 이온도체(ionic conductor)로 인식되며 전기장을 장시간 인가했을 때 전극표면을 관찰해보면 이에 대한 증거를 얻을 수 있었다. 반면에, 셀룰로오스를 비롯한 나무에는 결정구조로 인한 압전효과가 또한 있다. 이 압전효과를 분석하기 위해 Thermally Stimulated Current (TSC)와 유전상수를 측정 한 결과, 셀룰로오스 내부에 잔존하는 극성(dipole)의 효과가 꽤 있는 것으로 나타났다. 이 결과는 압전효과를 강하게 입증하는 것으로서, 셀룰로오스 종이를 가지고 제작한 EAPap에 압전효과가 있음을 나타내는 것이다. 따라서 EAPap의 작동원리는 온도, 습도에 따라 이온전이효과와 압전효과가 공존하는 것으로 판단되며, 이를 잘 조화한다면 기존의 EAP 재료가 갖는 단점인 높은 인가전압과 느린 응답성을 개선할 수 있을 것으로 기대한다.

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. 인하대학교에서는 마이크로파를 이용한 원격구동기술을 미국 항공우주국과 협동으로 개발하고

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

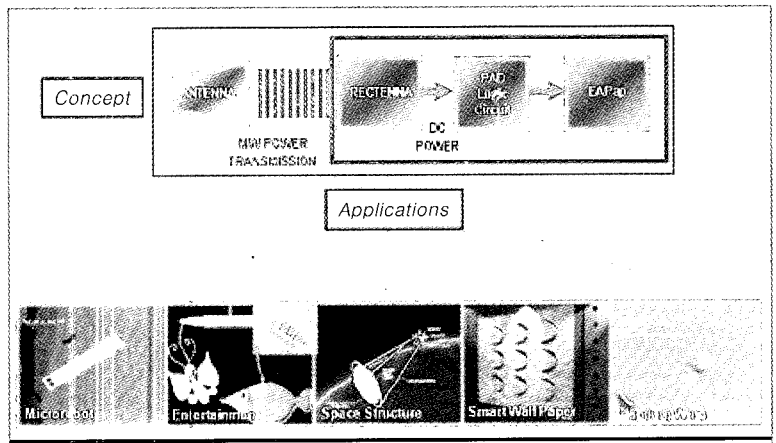


그림 8 마이크로파로 구동되는 생체모방 종이작동기의 응용

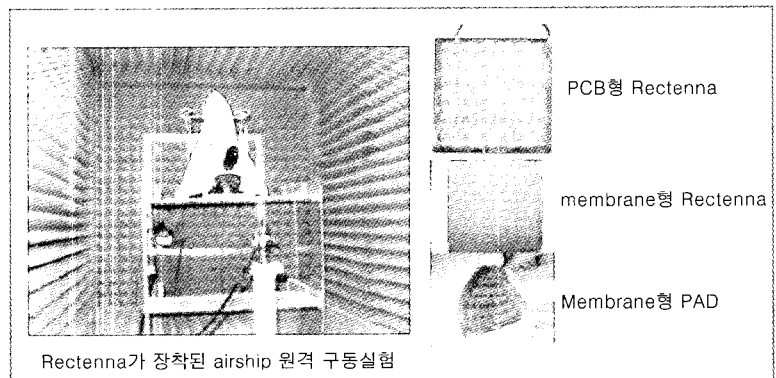


그림 9 마이크로파 원격구동 실험

있다. 그림 8은 마이크로파 원격구동기술의 개념을 나타낸 것이다. 마이크로파가 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. 그림 9는 개발된

rectenna를 airship에 장착하여 실험하는 모습이다. Rectenna는 최초에 PCB로 제작되었으나 지금은 유연한 박막 형태로 제작하여 어떤 형태의 제품에 부칠 수 있게 되었으며, 마이크로 패터닝 기술을 이용하면 생체모방 종이작동기의 전극 위에 rectenna 패턴을 바로 제작하여서 rectenna와 EAPap을 일체로 만들 수 있다. 현재 생체모방 종이작동기 제작 기술은 셀룰로오스 종이의 제조와 이 종이에 전극 및 rectenna 형상을 제작하는 마이크로 패터닝 기술이 연계되는데, 이러한 EAPap의 제작기술은 종이를 가지고 MEMS를 만들 수

있는 가능성이 있다. 종이 위에 전극의 마이크로 패턴을 만드는 것은 에칭문제로 인해 일반적인 반도체 공정으로는 어렵다. 따라서 micro transfer printing 기법을 이용하여 마치 스탬프를 찍

듯이 마이크로 패턴을 제작하는 연구를 하고 있다. 그림 10은 셀룰로오스 종이 위에 rectenna 및 SAW(Surface Acoustic Wave)의 전극형태를 MTP기법을 이용하여 금으로 만든 예이다.

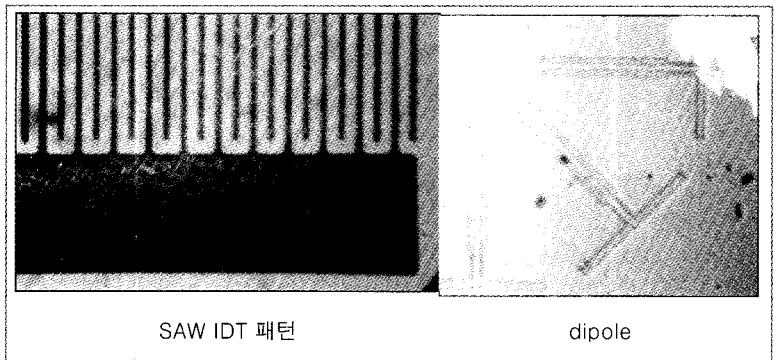


그림 10 Micro Transfer Printing 기법을 이용한 EAPap상 마이크로 패턴 제작

기계용어해설

임피더(Imperder)

고주파 전기용접에서 용접기 효율을 높이기 위해 피용접체 안에 위치시키는 물체로 페라이트같이 전기전도계수가 낮은 재질로 제조된다. 일반적으로 큐리 온도 이하로 유지하기 위해 수랭시킨다.

전기화학적 분극법(Electrochemical Polarization Method)

시편과 전극 사이에 흐르는 전위의 변화를 측정함으로써 재질열화를 평가하기 위해 개발된 비파괴 평가법이다.

재질열화(Material Degradation)

화력발전설비 및 중화학 설비의 주요부재들은 운전 중 고온에 노출되므로 장시간 사용하게 되면 재료의 미세조직에 변화가 발생하고 이에 따라 기계적 물성도 변화하게 된다. 이러한 현상을 재질열화라 한다.

시간-온도 대치(Time-Temperature Superposition)

피로수명에 있어서 시간(파괴 하중 사이클수)의 영향을 온도의 영향으로 바꾸어 시험하는 개념으로 장기간의 낮은 온도하의 실제(피로)환경을 단기간의 높은 온도하의 실험환경과 동일시하는 것

경통(Ion Column)

진공 속에서 이온을 집속시키는 전기기계요소

얼라인먼트(Alignment)

발생된 이온을 원하는 시료에 정확히 도달시키기 위하여 경통부의 요소부품을 정렬시키는 행위