

구 종 민 한국과학기술연구원 물질구조제어연구센터 책임연구원 | e-mail : koo@kist.re.kr
 박 현 철 한국과학기술연구원 물질구조제어연구센터 연구원 | e-mail : hpark@kist.re.kr
 권 태 훈 한국과학기술연구원 물질구조제어연구센터 박사과정 | e-mail : t13417@kist.re.kr

이 글에서는 생체 모방 분야에서 인공 근육 액추에이터의 유력한 소재로 주목받고 있는 전기활성 고분자 액추에이터에 대한 소개와 최근 연구 동향에 대해 소개하고자 한다.

개 요

액추에이터(actuator)란 전기적 에너지를 기계적 에너지로 직접 변환하여 기계적 변형을 만들어내는 소자를 의미하며 기존의 모터 구동부에 기어를 조합한 시스템에 비해 소형화 및 집적화가 가능하여 현재 이와 관련된 많은 연구들이 진행되고 있다. 액추에이터 소재로는 세라믹(EAC: electroactive ceramic), 형상기억합금(SMA: shape memory alloy), 전기활성 고분자(EAP: electroactive polymer)로 구분된다. 압전소재(piezoelectric material)로 대표되는 세라믹 소재는 빠른 응답속도, 우수한 재현성, 큰 구동력 등의 장점이 있지만 작동변위는 매우 작은 단점이 있다. 형상기억합금은 작동변위가 크고 작동전압이 낮은 장점은 있지만 매우 느린 응답속도를 가지는 단점이 있다. 반면에 전기활성 고분자(EAP)는 빠른 응답속도, 큰 작동변위, 구동 시 낮은 전력 소모량 등의 장점뿐만 아니라 고분자소재가 가지는 우수한 가공성으로 인한 경량화, 박막화, 소형화 등의 장점이 있어 많은 관심을 받고 있다. 전기활성 고분자는 햅틱 디바이스, 카메라 모듈, 촉각센서 등으로 응용 가능하며, 금속이나 세라믹 등의 재료와는 달리 인체 근육과 비슷한 탄성과 강

도를 가지고 있어 인공 근육이나 생체 모방 액추에이터로서의 응용 가능성 또한 지니고 있다.

전기활성 고분자 액추에이터

전기활성 고분자는 그림 1에서와 같이 작동방식에 따라 크게 두 가지로 분류한다. 이온의 이동과 확산에 의해 고분자가 수축-팽창 변형을 일으키는 이온성 전기활성 고분자(Ionic EAP)와 외부에서 가해진 전기장에 의해 전기쌍극자(dipole)들의 전자 분극(polarization) 현상에 의하여 변형이 일어나는 전자성 전기활성 고분자(electronic EAP)로 구분된다. 이온성 전기활성 고분자로는 전기유변유체(ERF: electrorheological fluid), 탄소나노튜브(CNT: carbon nanotube), 전도성 고분자(CP: conducting polymer), 이온성 고분자-금속 복합체(IPMC: ionic polymer-metal composite), 고분자젤(IPG: ionic polymer gel) 등이 있으며 전압이 인가되었을 때 용매 분자에 둘러싸인 이온들이 반대 전하를 띠는 전극 방향으로 이동하게 되고 양전극방향에서의 상대적 부피차이가 발생하여 기계적 굽힘(bending) 변형이

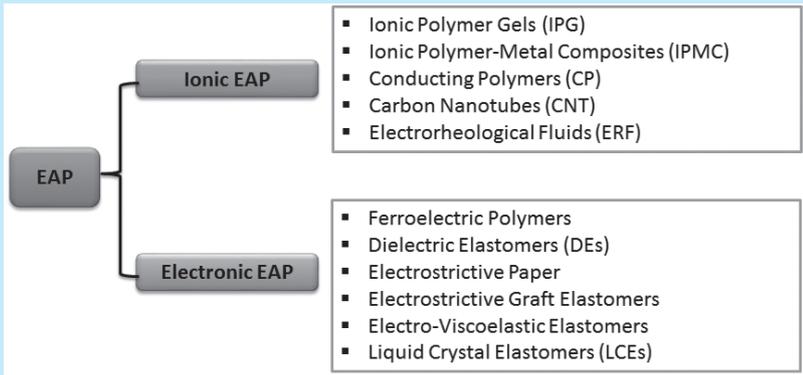


그림 1 전기활성 고분자의 종류

일어나는 특성을 가진다. 인가전압이 낮은 장점이 있지만, 구동력이 작고 응답속도가 느리며 정교한 변위 조절이 힘든 단점이 있다. 이를 개선하기 위해 이온전도도가 향상된 전기활성 고분자 개발 및 전기화학적 안정성이 우수한 시스템에 대한 개발이 진행되고 있다. 한편 전자성 전기활성 고분자(Electronic EAP)는 액정탄성체(LCE: liquid crystal elastomer), 전기점탄성 탄성체(electro-viscoelastic elastomer), electrostrictive paper, electrostrictive graft elastomer, 유전탄성체(dielectric elastomer), 강유전성 고분자(ferroelectric polymer) 등이 있으며 외부에서 가해진 전기장에 의해 전기쌍극자(dipole)들의 전자 분극(polarization) 현상이 일어나고 이로 인해 양 전극에 유도된 전하들의 정전기적 인력(electrostatic attraction)에 의해 기계적 변형이 유도된다. 전자성 전기활성 고분자는 이온전 전기활성 고분자에 비해 작동 전압은 높지만 응답속도가 빠르고 정교한 변위조절이 가능한 장점이 있다. 특히 유전탄성체는 다른 전기활성 고분자에 비교하여 매우 큰 작동변위 구현이 가능하며 전력소모량이 매우 낮고 큰 구동력을 가지며 우수한 작동 신뢰성을 가지고 있어 많은 연구들이 진행되고 있다. 하지만 유전탄성체는 매우 큰 작동 전압이 필요한 단점이 있어 작동 전압을 낮추기 위해 낮은 기계적 탄성률과 낮은 유전손

실을 보이면서도 높은 유전상수특성을 보이는 유전탄성체 개발에 관한 연구들이 진행되고 있다.

유전탄성체 액추에이터

전자성 전기활성 고분자 중 상용성이 우수한 유전탄성체 액추에이터의 작동원리는 Maxwell stress 효과, electrostriction 효과, space charge injection 효과 등에 의해 설명된다.

그림 2(a)처럼 유전탄성체의 전극에 외부 전장이 인가될 경우, 분극현상에 기인하여 한쪽 전극 표면에는 양전하가 반대쪽 전극 표면에는 음전하가 축적된다. 양쪽 전극에 축적된 전하들 간에 정전기적 Coulomb 인력에 의해 두께방향으로 수축하려는 힘을 Maxwell stress라고 정의한다. 또한 그림 2(b)처럼 유전탄성의 변형은 양전극에 축적된 전하들의 상호작용과 관계없이 자발적인 분극 자체의 효과에 의해 변형이 유발될 수 있고 이를 true electrostriction effect라고 정의한다. 또한 그림 2(c)처럼 유전탄성체에 multiphase domain구조를 가질 경우 또는 필러가 첨가된 복합체의 경우 전기장이 인가되면 도메인 간의 계면 또는 필러와 고분자 사이의 큰 계면에 전하가 축적되게 되고 이렇게 축적된 전하들에 의해 전기역학변위가 향상된다. 이러한 효과를 space charge injection효과라고 한다. 특히 필러들이 포함된 복합체의 경우 space charge효과에 의한 큰 변위 향상이 보고되고 있다.

유전 탄성체 액추에이터는 외부에서 가해진 전기장에서 변형을 일으키는 탄성 고분자와 유연 전극을 결합하여 만들어지는데 높은 변형률과 빠른 응답 속도, 높은 전기역학 변형 효율 등이 가장 큰 장점이다. 이러한 유전 탄성체 물질은 낮은 제작 가격으로 고효율 변형 특성을 가져 그림 3과 같이 고체 광학장치,

인공 장기용 펌프 및 스마트 피부, 음향 액추에이터와 로터리 모터 등의 다양한 응용 영역을 갖는다. 특히, 로봇틱스에 응용되는 인공 근육 액추에이터는 낮은 가격과 가벼운 선형 액추에이터로 각광받고 있다. 아직까지 높은 작동 전압이라는 단점이 있지만 전압을 낮추려는 다양한 연구들이 계속해서 발표되면서 상용화에 점점 근접하고 있다.

이온성 고분자-금속 복합체 액추에이터

이온성 전기활성 고분자 중 상용성 있는 작동시스템으로 고려되고 있는 이온성 고분자-금속 복합체(IPMC)는 고분자 소재의 특성으로 가볍고 유연하며 낮은 전압(1~5 V)에서 큰 변형 및 무게대비 큰 구동력을 나타낸다. 또한, 이때 사용되는 IPMC는 액추에이터로서뿐만 아니라 센서로서도 사용이 가능하다. IPMC의 양 전극에 전압을 인가하면 굽힘 변형이 발생하고, 반대로 IPMC를 기계적으로 변형시키면 양 전극 사이에서 전위차가 발생하여 센서로 이용이 가능하다.

IPMC 액추에이터의 구성은 그림 4와 같이 중앙에 이온전달특성이 우수한 고분자 전해질 막과 막의 양면에 전자전달 특성이 우수한 금속전극이 입혀진 커패시터 구조로 이루어져 있다. 고분자 전해질 막으로는 통상 수소 이온전달특성이 우수한 나피온(Nafion™)과 같은 이온성 고분자 전해질들이 사용되고 있으며, 전극으로는 전기화학적 안정성이 우수한 백금 또는 금 등이 주로 사용된다. 전극은 주로 금속

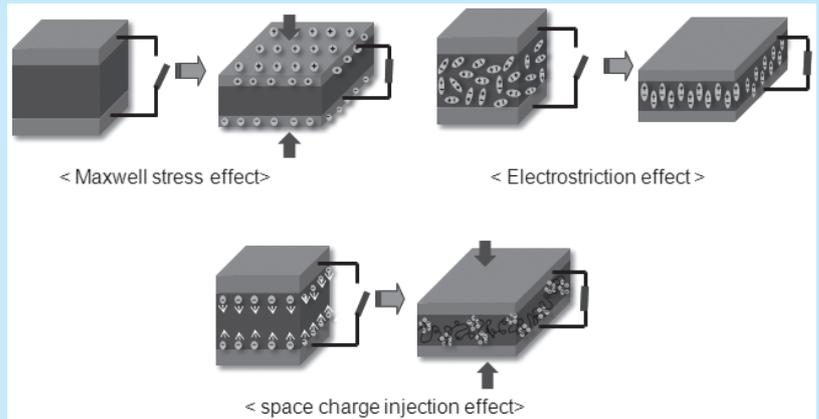


그림 2 유전탄성체 액추에이터의 작동 원리

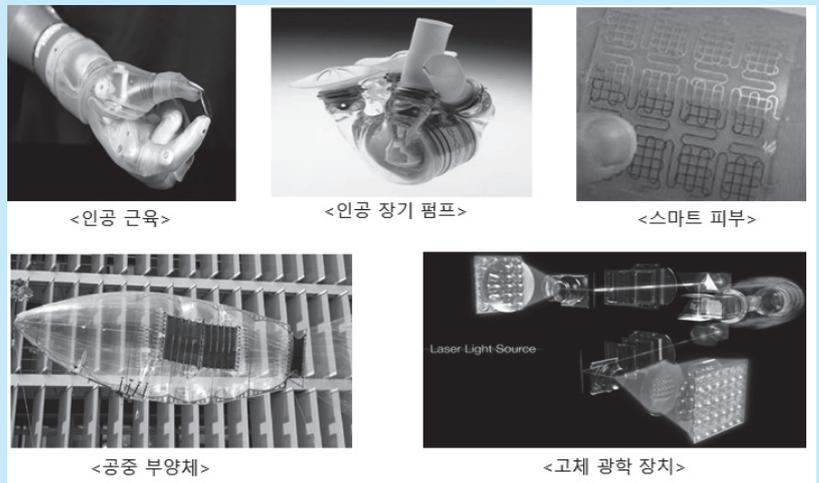


그림 3 유전탄성체(dielectric elastomer)의 다양한 응용 영역

염을 고분자전해질에 함침시킨 후 환원제를 이용하여 고분자전해질 표면에 전극 층을 환원 침적시키는 무전해도금법에 의해 형성시킨다. 나피온 고분자 전해질 막의 경우 내부에 고정되어 있는 음이온과 이온 쌍을 이루고 있는 금속 양이온(주로 lithium 이온) 그리고 이들의 해리 매체(dissociation medium)로서 물이 포함되어 있다. 이때 IPMC 액추에이터 작동을 위해 전극에 전압을 인가하면 내부에 존재하는 금속 양이온은 물에 수화된 상태로 음극으로 대전된 IPMC 전극방향으로 이동하게 되고, 이에 따라 발생된 양쪽

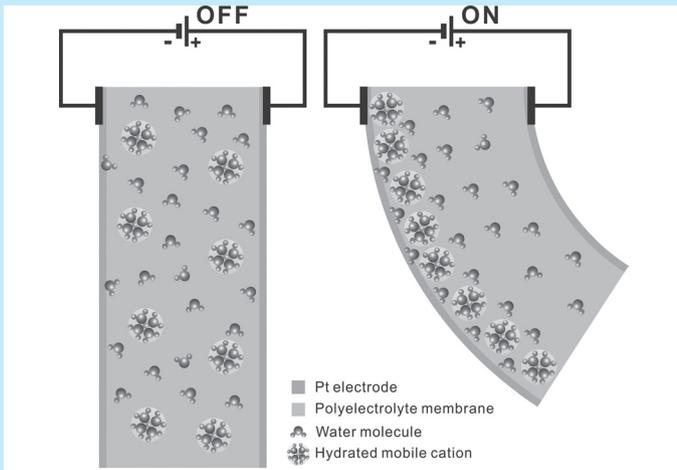


그림 4 IPMC 액추에이터의 구조 및 작동원리

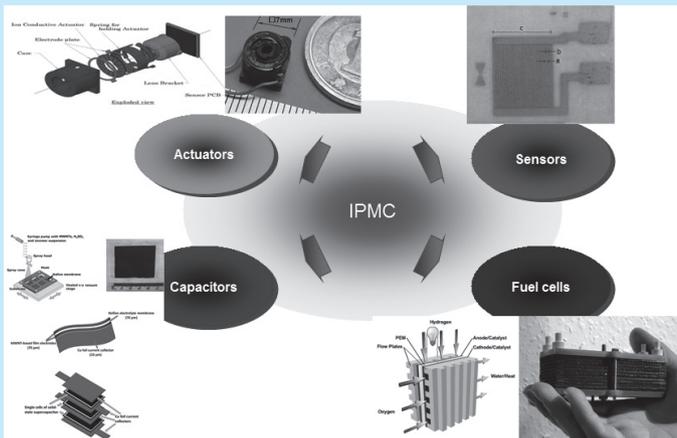


그림 5 IPMC 액추에이터의 응용 연구 분야

전극 사이의 이온 농도의 불균형은 삼투압을 야기하여 음극으로 대전된 전극방향으로 이동하는 물 분자의 양을 증가시킨다. 결과적으로, 음극으로 대전된 전극 층은 팽창하고, 양극으로 대전된 전극 층은 수축하여 IPMC의 굽힘 변형(bending deformation)이 일어난다.

IPMC는 최근 10년 간 급속히 성장하는 분야 중의 하나로, 다른 고분자 액추에이터에 비해 경량, 유연성, 낮은 구동전압 하에서 큰 굽힘 변형 및 무게대비 큰 구동력을 나타내므로 그림 5에 나타난 바와 같이 소규모 구동 부품이나 인공 근육 등의 생체 모방 액추

에이터 제작 분야에 대한 응용 연구가 널리 진행되고 있다. 이외에도 촉각 센서 등의 on/off switching 소자, 위치 센서, 속도 센서 등 다양한 센서 시스템에 적용하기 위한 많은 연구들이 보고되고 있으며, 또한 구조적으로 유사한 슈퍼캐패시터, 고분자 연료전지 등 다양한 분야에 활용이 가능하여 1990년대 이래로 최근까지 연구가 활발히 진행되고 있다.

맺음말

전기활성 고분자 액추에이터는 큰 작동변위, 큰 구동력, 저비용 등의 다양한 장점을 가지고 있는 차세대 액추에이터 소재로써 로봇, 다양한 보철 기구 등의 구동부와 센싱부를 대체할 수 있고, 또한 지능형 운행체에서 주도적 역할을 수행할 초소형 무인 플랫폼(초소형 비행체, 전술로봇) 및 유비쿼터스 센서 네트워크 시스템, 초소형 모바일 시스템 등의 다양한 응용분야에 바로 적용 가능하여 그 파급 효과는 매우 클 것으로 전망되고 있다. 하지만 보다 넓은 분야에 적용하기 위해서 해결해야 할 문제들이 있으며, 유전탄성체의 매우 큰 작동 전압을 줄이기 위한 연구, IPMC의 작동 변위, 응답 속도 향상 및 작동 안정성 확보 등을 해결하기 위해 다양한 연구가 진행되고 있다. 해외 기업에서는 햅틱 게임기, 관상용 물고기, 카메라 렌즈 등에 시제품을 출시하고 있고 많은 대학, 연구소, 기업들의 연구기관들이 연구를 수행하고 있으며, 매년 새로운 아이디어와 이를 구현한 사례가 발표되고 있다. 하지만 국내에서는 전기활성 고분자 액추에이터에 관한 연구 및 연구지원이 미미한 실정으로, 선진국과의 기술격차를 줄이고 전기활성 고분자 액추에이터 기술을 선점하기 위해 국가적인 연구사업 지원 및 다양한 연구지원이 이루어지길 기대해 본다.