



# 전기 활성 고분자 복합재 기술 및 응용

이상복, 이진우, 이원오, 이제욱, 엄문광 | 재료연구소

## [ 요약문 ]

전기 활성 고분자 복합재는 전기적 자극을 가하여 기계적 움직임을 얻을 수 있고, 기계적 자극을 통해 전기적 신호를 얻을 수 있어 차세대 액추에이터 및 센서와 생물학적 조직과의 유사성으로 인공 근육 및 로봇분야의 응용소재로 최근 주목받고 있다. 본고에서는 전기 활성 고분자 복합재의 기본적인 개념과 함께 국내외 기술 동향을 살펴보았다. 또한 전기 활성 고분자 복합재에 있어 핵심내용인 전기 활성 소재의 종류 및 작동원리, 전극소재, 이를 이용한 센싱 및 액추에이팅 구동특성과 응용에 대해 소개하고 마지막으로 현 시점에서의 전기 활성 고분자 복합재 응용에 있어 문제점과 이를 해결하기 위한 연구방안에 대해 언급한다.

## 1. 서 론(기술의 개요)

전기 활성 고분자(Electro-active polymer, EAP)는 전기 자극에 의해 팽창, 수축 및 휨 현상을 재현성 있게 나타낼 수 있는 고분자로서 약 20여년 전 현상이 발견된 이후 다양한 고분자에 대한 검토가 이루어 졌으며 응용 연구 또한 활발히 진행되어 왔다. 특히 전기적인 자극을 가하면 기계적인 움직임을 얻을 수 있고, 기계적인 자극이 주어지면 전기를 얻을 수 있어 차세대 액추에이터와 센서로서 적용가능성이 매우 큰 소재이다. EAP 연구는 크게 electronic EAP와 ionic EAP로 나눌 수 있으며, 대표적인 소재로는 전도성 고분자, 이온성 고분자 겔, 이온성 고분자/금속 복합물(Ionic polymer/metal composite, IPMC), 탄소나노입자 함유 전도성 고분자 등이 있으며, 이 중 가장 활발하게 연구가 이루어지고 있는 분야는 IPMC이다. IPMC는 정전기력에 의해 구동되는 복합 액추에이터 소재로 많은 연구자들에 의해 개발되어 왔으며, 인공근육을 비롯하여 인공심장, 스마트 피부, 초정밀기계, 센서/액추에이터, 개인군사 장비의 발전기, 의료용 로봇, 우주항공 분야, 연료전지, 펌프 등의 여러 분야에 적용이 가능하기 때문에 최근 전 세계적으로 많은 연구가 이루어지고 있다<sup>[1]</sup>. 특히 IPMC 액추에이터는 생체 모방형 액추에이터(biomimetic actuator) 분야에 다양하게 적용되고 있는데, 생체 적합성이 우수하고 수분을 포함한 유기 화합물이라는 점에서 생체 조직과 많은 유사성을 지니며 이러한 특성 때문에 다른 액추에이터와 비교하였을 때 생체 모방 시스템에 이용될 수 있는 더 큰 가능성을 갖는다<sup>[2]</sup>. 또한 기존의 액추에이터에 비해서 저전압으로 구동이 가능하고 동작 시 열이나 전자기파 등을 발생하지 않기 때문에 인공 근육의 제작 또는 팔다리의 동작을 모방하는데 사용할 수 있는 등 향후 큰 성장이 예상되는 기술분야로 판단된다.

본고에서는 전기 활성 고분자 및 응용에 있어 국내외 기술의 동향과 함께 주요 연구내용으로 전기 활성 고분자 소재 및 전극소재와 이를 이용한 전기 활성 고분자 복합재 센서 및 액추에이터 응용에 대해 기술하고자 한다.



## 2. 전기 활성 고분자 기술 동향

### 2.1 국외 기술 동향

전기 활성 고분자 복합재의 발전 과정은 전도성 고분자 기술, 이온성 고분자 겔, 탄소나노 소재 등의 개발과 그 역사를 같이 한다. 그림 1은 전기 활성 고분자의 개발 과정을 나타낸 것이다. 1992년 일본의 Y. Osada가 이온성 고분자 겔의 작동 원리를 처음으로 발표하였고<sup>[3]</sup>, 일본의 Oguro가 1993년에 IPMC 액추에이터에 대한 특허를 처음으로 등록하였다. 그 후 세계 많은 연구그룹에서 Dielectric Elastomer 액추에이터, 수용성 고분자 액추에이터 등에 관한 연구를 발표하였다. 또한 EAP 액추에이터에 대한 연구는 1990년대에 전도성 고분자의 개발과 풀러렌(Fullerene, C<sub>60</sub>), 탄소나노튜브 같은 탄소나노소재의 발견으로 비약적인 발전을 거듭하였다. A. J. Heeger, MacDiarmid, Shirakawa에 의해서 개발된 전도성 고분자(2000 Nobel Prize)는 처음부터 전기 활성 고분자로 가능성을 보였고, 1999년 Smela에 의해서 Advanced Materials지에 처음으로 전도성 고분자 액추에이터가 소개되었다. 뿐만 아니라 단일벽 탄소나노튜브(Single-wall carbon nanotube)와 Nafion 고분자(Brian, Nano Letter 2002), 다중벽 탄소나노튜브(Multi-wall carbon nanotube)와 SSEBS같은 탄소나노소재/고분자 복합재를 이용한 EAP가 발표되었다.

	1990	2000	2010
<b>Hydrogel Actuators</b>	Polymer gel Osada/Nature(1992)	Dielectric Elastomer Pei/Science(2000)	Hydrogel Kim/Nature Materials(2006)
<b>IPMC Actuators</b>	IPMC Actuator Oguro/US Patent(1993) Polymer (1995)	SSEBS Actuator Oh/Mater. Lett.(2007)	PVA/SPTES Actuator Oh/Macromolecules(2009)
<b>Conductive Polymer Actuators</b>	Conductive Polymer Heeger, MacDiarmid, Shirakawa(1997)	Conjugative Polymer Actuator Smela/Adv. Mater.(1999)	
<b>CNT Actuators</b>	CNT Iijima/Nature(1991)	Wet type CNT Actuator Baughman/Science(1999)	Yarn Actuator Baughman/Science(2005)
<b>Bio-Polymer &amp; Nano-Composites</b>		SWNT+Nafion Brian/Nano Lett. (2002)	Aligned MWCNT Bruce/Science (2004) Bacterial Cellulose Actuator Oh/Progressing (2009)

그림 1. 전기 활성 고분자 액추에이터의 개발 과정

표 1은 상용화된 나피온 고분자를 이용한 IPMC 액추에이터와 이의 단점을 보완하기 위하여 개발된 새로운 종류의 EAP 물질을 정리하였다. 연료 전지용 멤브레인으로 널리 이용되고 있는 나피온 고분자는 낮은 전압에서도 액추에이터 구동이 가능하고 센서로도 이용이 가능하지만 가격이 매우 비싸고, 장시간의 구동에는 적합하지 않다는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 Sulfonated poly(Styrene-b-Ethylene-co-Butylene-b-Styrene) (SSEBS), styrene-maleimide alternating polymer와 PVDF의 블렌드(PSMI/PVDF), Sulfonated poly(styrene-ran-ethylene(SPSE), Sulfonated poly(ether ether ketone)와 PVDF의 블렌드(SPEEK/PVDF)와 같은 새로운 EAP 신물질들이 개발되고 있다.

EAP에 대한 연구는 미국의 SRI International사에서 1991년 이후 개발을 시작한 이래 기업에서도 활발히 진행되고 있다. SRI International사에서 변형률이 200~300% 이상이 되는 액추에이터를 실리콘이나 우레탄 고분자 등을 이용하여 개발한 시제품이 보고되고 있으며, 최근 Artificial Muscle Inc.(AMI, California, USA) 사를 통해 상용화 제

품 개발을 시작하였다. 또한 DARPA에서 자체적인 자가 발전 시스템이 요구되는 개인 군사 장비의 구동용으로 사용하기 위해 연구 진행 중이며 신발, 군낭 및 팔, 다리 등에 부착하여 최대 10W의 전력을 얻은 결과가 보고되고 있다. 또한 EAP 엔진은 무소음 및 저중량의 특성을 가지고 있어 고공정찰을 담당하는 무인 항공기에 적용 가능하며, UTIAS에서 연구 중에 있다.

표 1. 최신 EAP 액추에이터 재료 및 특성

액추에이터 종류	개발 재료	특성
IPMC 액추에이터	Nafion	낮은 전압으로 구동가능, 화학적 안정성 우수, 매우 고가
	SSEBS	고분자 블록 길이 조절을 통해 기계적 성질 조절 가능, 높은 전기 전도도
	PSMI/PVDF	이온 채널의 사이즈 조절 가능
	SPSE	기계적 성질, 수소이온 전도도 우수
	SPEEK/PVDF	혼합비율을 조절하여 기계적 성질, 친수성, 수소 이온 전도도 향상가능
나노 복합재 액추에이터	CNT+Nafion	큰 구동 변위, 낮은 구동 전압
	CNF+SSEBS	탄소나노섬유 강화제의 첨가를 통한 SSEBS의 기계적 성질 향상
	C60+Nafion	플러렌의 첨가를 통하여 센싱 시그널 증폭

## 2.2 국내 기술 동향

국내의 연구 또한 EAP의 연구 분야 중 IPMC에 대해 중점적으로 이루어지고 있으며 KAIST/전남대학교, 고려대학교, 건국대학교, 서강대학교 등의 대학교를 중심으로 이루어지고 있다. 특히 KAIST/전남대학교에서는 기존의 나피온계 이온성 고분자를 대체할 수 있는 다양한 신고분자를 이용한 IPMC 액추에이터 제작 연구를 선도하고 있으며, 더 나아가 CNT, Fullerine, Graphene등의 탄소나노소재를 활용한 IPMC 연구에도 왕성한 활동을 보이고 있다. 또한 서강대학교 및 고려대학교 등에서는 IPMC 액추에이터의 구동 수치해석 및 모델링 연구를 진행하고 있으며 건국대학교의 AMRC 센터와 재활공학연구소에서는 생체 및 근육의 작동원리를 구현할 수 있는 인공근육형 작동기를 개발하는 것을 목표로 하여 압전세라믹 작동기와 EAP형 작동기를 연구하고 있으며, 곤충 날개 구조를 공학적으로 모방한 인공근육 제작에 적용할 예정이다. 또한 최근에 Hanson Robotics와 KAIST가 EAP 재료를 사용하여 Albert Hubo의 artificial face를 공동으로 제작하였다.

EAP를 활용한 에너지 생산 연구와 관련하여 국내의 연구는 압전효과 보다 그 반대개념인 역압전효과를 이용하여 산업계에 응용하는 연구가 주를 이루고 있고 발전기의 개념은 매우 초보적인 단계에 있다. 한국기계연구원, 한국생산기술연구원, 인하대학교, 한국과학기술원, 서강대학교 및 서울대학교 등에서 압전식 에너지 수확을 위한 재료 연구, 진동 발생장치를 구현하는 연구, 최적의 에너지 변화기술을 위한 회로 연구들이 이루어지고 있다. EAP를 이용한 신재생 에너지 개발 분야에서 국내의 기술은 압전소자 보다 더 늦게 연구가 진행되어 미국, EU 및 일본에 비해 크게 뒤떨어져 좀 더 활발한 연구가 진행되어야 할 것으로 사료되며, 동국대학교, 인하대학교, 기능성 고분자 신소재 연구센터 및 재활연구소에서 EAP 재료와 응용분야에 대한 연구가 진행 중이다. 국내에서는 EAP power generation 분야에 대한 연구는 연구 태동기에 있으며 한국전자통신연구원에서 기초 연구를 수행하고 있다.

재료연구소에서는 전도성 입자(극미세 금속섬유, 탄소나노튜브, 그래핀)첨가 전도성 고분자 소재, 무전해도금을 통한 IPMC 전극 제조 및 조직제어, IPMC의 액추에이터 및 센서로서의 구동특성에 대한 연구를 진행하고 있다.



표 2. 이온성 고분자 복합재 관련 국내 연구동향

구분	기관	주요연구/개발내용
산	(주) 프로바이온	- 폴리아닐린-이온성 액체 복합체의 물리적/전기화학적 특성 연구
학	KAIST/전남대학교	- 비나피온계 IPMC 성능 연구 - IPMC 다중전극 연구 - IPMC 구동기의 진동 특성 연구 - EAP의 이온망상 구조 연구 - 그래핀/EAP 나노 복합체 연구
	고려대학교	- PEDOT/고분자 이온성 액체 복합체 연구 - IPMC의 금속 코팅 및 캐스팅 공정에 의한 구동기 제조 연구
	서강대학교	- 생체모방형 IPMC 구동기 설계 - IPMC 구동의 이론적 모델링
	단국대학교	- IPMC의 열처리 성형 공정 연구
	전주대학교	- IPA 구동의 유한요소 수치해석
	건국대학교	- 나피온/알루미나 IPMC 제조 - EAP를 이용한 인공 근육 구동기 개발
	서울대학교	- EAP를 이용한 인공 근육 연구
	울산대학교	- 무기고분자 이용 아크릴계 IPMC 연구
연	한국화학연구원	- 이온성 고분자 재료 기초 개발 연구
	재활공학연구소	- 표면조도에 따른 IPMC 구동특성 연구 - IPMC의 전극 형성 및 이온 교환막 성능 연구
	한국전자통신연구원	- EAP를 이용한 신재생 에너지 생산 연구
	재료연구소	- 전도성/이온성 고분자 및 탄소나노입자/고분자 복합재 연구 - IPMC 전극 조직제어, 액추에이팅/센싱 구동특성

### 3. 전기 활성 고분자 복합재

#### 3.1 전기 활성 고분자 (Electro-active Polymer)

외부의 전기적 에너지를 통해 변형이 유도되는 EAP는 크게 전기장에 의해 활성화되는 electronic EAP와 내부의 이온 이동에 의해 활성화되는 ionic EAP로 나눌 수 있다. 두 가지 모두 근본 작동 원리는 전극을 통해 전달되는 전기 에너지를 안정화 시키려는 힘이 작용한 것으로 electronic EAP는 분극에 의해 생성되는 쿨롱 힘이 변형을 일으키며, ionic EAP는 전압 차에 의한 전하 균형을 맞추기 위해 고분자 내외부에서 전해질에 존재하는 이온 이동으로 인해 팽창과 수축이 발생한다. 각각의 구동 원리는 소재의 특성에 좌우되는데 표 3은 EAP의 재료에 따른 분류이다<sup>[4]</sup>.

EAP와 유사한 특성을 보이는 소재로는 형상기억합금(Shape Memory Alloy)이나 전기활성 세라믹(Electroactive ceramic)이 있지만 EAP가 상대적으로 대변형을 일으키며 우수한 강인성과 빠른 응답성으로 인해 응용성이 높은 것으로 평가되고 있다<sup>[5]</sup>.

표 3. EAP 재료별 분류 및 특징

	Electronic EAP	Ionic EAP
소재	Dielectric EAP Electrostatic Graft Elastomer Electrostrictive paper Electro-viscoelastic elastomers Ferroelectric polymers Liquid crystal elastomers	Carbon nanotubes Conductive polymers Electrorheological fluids Ionic polymer gels Ionic polymer metallic composites (IPMC)
특징	높은 전위차에 의해 구동 기계적 성질 우수 높은 구동력/내구력	낮은 구동 전압
용도	산업용 및 군사용 로봇	소형화 휴머노이드 부품 생체 모방형 인공 근육

3.1.1 전기장에 의해 작동되는 EAP(Electronic EAP)

Electronic EAP는 전기장에 의해 변형이 발생하는 원리에 따라 크게 전왜(Electrostrictive)와 유전성(Dielectric) EAP로 나눌 수 있다. 대표적인 전왜 EAP는 PVDF(Polyvinylidene fluoride)와 그 공중합체를 들 수 있다. PVDF는 반 결정성의 강유전성(Ferroelectric) 고분자로 높은 탄성계수를 가지면서도 유연성이 우수하고 필름으로 제조하기 용이하다. 그러나 2%의 변형을 일으키기 위해서는 거의 200MV/m의 전압이 요구되는데 이 정도 전압은 유전 파괴를 일으킬 수 있다. 대변형을 유도하기 위해 PVDF에 가소제를 첨가하기도 하나 탄성계수가 감소하는 단점이 있다. 높은 탄성계수와 대변형을 일으키기 위해 poly(vinylidene fluoride-co-trifluoroethylene) 공중합체에 전자를 조사하여 고분자의 결정 구조에 결점을 만들어 유전 손실을 최소화하는 방법이 적용되었다. 이를 통해 거의 1GPa의 탄성계수에 5%의 변형이 가능하였다<sup>[6]</sup>.

탄성 중합체(Elastomers)와 같이 유연하고 유전 상수가 큰 고분자는 전기장을 가하여 높은 변형을 일으키는 유전성 EAP로 사용할 수 있다. 작동 원리는 두 개의 유연 전극 사이에 탄성 중합체를 적층시키고 전위차를 걸어 주면 고분자는 강한 전기장에 의하여 캐패시터에서와 같이 전하 분리가 일어나며 그 인력으로 인해 탄성 중합체를 압착하면서 변형이 일어난다.

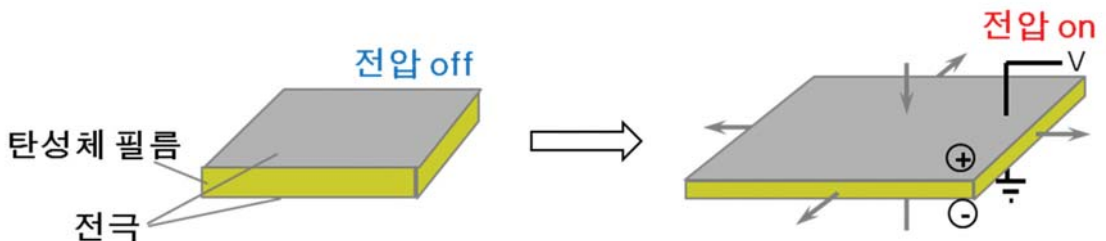


그림 2. 유전성 탄성 중합체의 전기적 변형

Polydimethyl siloxane(PDMS)으로 제조된 고분자 필름이 안정된 높은 변형을 나타내는 대표적인 유전성 EAP로 알려져 있으며 다른 여러 가지의 유전성 고분자들도 큰 변형을 나타내는 것으로 파악되었다. 그 중 acrylic계 탄성 중합체를 사용했을 때 300% 이상의 평면 변형이 가능함이 확인되었다. 그러나 PDMS와 비교하면 점탄성 손실이 크고 반응 속도가 느린 단점이 있어 더욱 연구가 필요하다.

액정 탄성체(Liquid crystal elastomer)는 1981년 개발된 이후 온도를 올려서 압전 특성과 전기 활성 특성을 가진



EAP 액추에이터에 많이 적용되었다. 그림 3과 같이 액정 탄성체의 작동원리는 액정의 상전이 즉 짧은 시간 안에 액정이 nematic에서 isotropic으로 변하거나 또는 배향의 변화로 변형을 유발한다. 2001년 Naval Research Laboratory에서 액정 탄성체가 인체 근육에 필적하는 탄성을 나타낼 수 있다는 것을 발표하였다. 이방성 nematic 필름을 액정 단량체, 가교 밀도 및 가교 방법을 달리하여 평가하였으며 400% 변형을 나타내기도 하였다<sup>[6]</sup>.

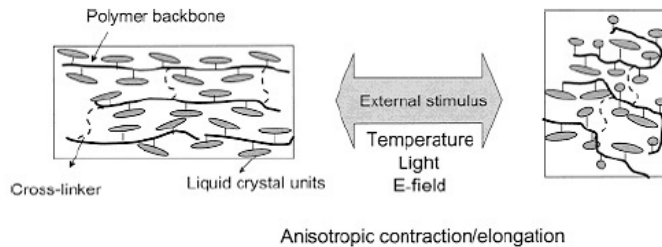


그림 3. 액정 탄성체의 작동원리

### 3.1.2 이온에 의해 작동되는 EAP(Ionic EAP)

Ionic EAP는 크게 고분자 겔(Polymer gel), 이온성 고분자-금속 복합체(Ionic polymer metal composites, IPMC) 및 전도성 고분자(Conducting polymer)로 나눌 수 있다. 고분자 겔은 고분자가 가교 반응을 통해 네트워크를 형성하여 탄성계수를 가지므로 형상을 유지하면서 온도, 용매, pH, 전기장 및 생체 화학적 인자에 따라 내부 swelling된 물질의 성질이 변화하여 변형을 발생시킨다. 고분자 겔에는 가교된 고분자 망에 이온화 그룹을 가지고 있는 이온성과 유전성 용매가 swelling 되어 있는 비이온성 두 가지가 있다. Polyacrylamide(PAAm)와 poly acrylic acid(PAAc) 수화 겔(Hydrogel)은 이온성 고분자 겔로서 전극 사이에 적층시키면 전기장에 따라 변형을 일으키는 데 이는 이 고분자 겔의 pH에 따른 이온화에 의한 것이다. Polyvinyl alcohol(PVA) 수화 겔이나 polyvinyl chloride에 dioctyl phthalate(DOP)를 사용한 겔은 비이온성 고분자 겔로서 전기장을 가하면 변형을 일으킬 수 있다. 또한 PVA에 dimethyl sulfoxide(DMSO)를 swelling 시켜 만든 EAP 액추에이터는 5% 이상의 변형을 낼 수 있음이 보고되었으나 전극을 부착하기 어렵고, swelling 상태가 계속 유지되어야 하는 단점이 있다.

IPMC는 낮은 전기장이 인가되었을 때에 큰 굽힘 변형을 내는 대표적인 EAP로서 주요 재료는 나피온 기본 고분자 필름에 백금 전극이 입혀진 형태이다. 백금 전극은 일반적으로 무전해 도금으로 증착하며 유연성이 있어야 한다. 또한 나피온 고분자는 물에 swelling 되어 있어 건조한 환경에서 적용하기 위해서는 밀봉이 잘 되어야 한다. 나피온은 화학적으로 매우 안정하며 DC/AC 모두에서 대변형을 나타낼 수 있고 낮은 전압에서도 센서나 액추에이터로 적용할 수 있다. 그러나 가격이 비싸고 1.23V 이상에서 가수 분해 반응이 일어나며 환경 친화적이지 못한 단점들로 인해 이를 대체하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[7]</sup>.

Poly(styrene-*b*-ethylene-*co*-butylene-*b*-styrene)(SSEBS)는 일종의 triblock 공중합체로 일종의 탄성체이다. 유리전이온도가 높은 polystyrene domain이 가교점으로 작용하고 유리전이온도가 낮은 polybutadiene이 matrix로 작용하는데 이온 전도도가 높고 흡수율이 우수하다. Nafion에 비해 가격이 저렴하며 필름의 강성을 조절할 수 있는 장점이 있으나 tip 변형이 상대적으로 작은 단점이 있다. Poly(styrene-*co*-maleimide)(PSMI)/PVDF interpenetrating network 필름 또한 Nafion을 대신할 수 있는 재료로 연구되고 있다. 이 필름의 장점은 이온 채널을 나노 크기로 조절할 수 있다는 것이며 PSMI과 PVDF의 조성을 변화시킴으로써 흡수율, ion exchange capacity(IEC) 및 이온 전도도를 조절할 수 있다. 또한 Nafion 보다 변형이 크며 back relaxation 현상이 나타나지 않는 장점이 있다. Poly(styrene-*co*-ethylene)(PSE)를 sulfonation 시켜서 제조하는 sulfonated Poly(styrene-*co*-ethylene)(SPSE) 또한 새로운 EAP 기본 고분자로 각광 받고 있다. SPSE는 기계적 강도가 우수하고 이온 전도도와 IEC가 높아서 IPMC 액추에이터로 적용할 수 있다. SPSE는 응답 속도는 빠르나 tip 변형이 작은 단점이 있다. Tip 변



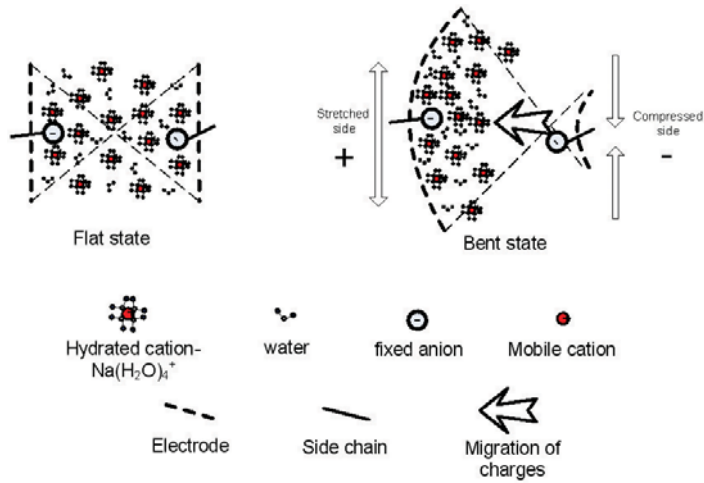


그림 4. IPMC의 작동원리<sup>8)</sup>

형이 작은 단점을 극복하기 위해 SPSE에 UV를 조사하고 vinyl silane을 반응시켜 silane 가교된 SPSE를 제조하였다. Vinyl silane이 결합됨에 따라 흡수율은 떨어지지만 tip 변형은 SPSE에 비해 대폭 향상되었다. Sulfonated poly(ether ether ketone) (SPEEK)와 PVDF 블렌드로 제조된 필름은 높은 내화확성과 강성을 가지고 있다. Nafion에 비해 높은 IEC와 흡수율을 가지고 있으나 이온 전도도가 떨어지는 문제점이 있다. PES, PSU, PPS, polyphenylene oxide 등의 고분자를 sulfonation 시켜 PVA를 통해 가교 시킨 고분자 필름도 고려되고 있다.

전도성 고분자는 산화 환원 시 주로 이온의 이동에 따른 부피 변화로 수축과 팽창이 일어난다. 전도성 고분자는 polypyrrole (PPy), polyaniline (PANI) 및 polythiophene (PTh)의 3종류가 주로 이용되고 있는데 공통적으로 backbone 구조에 2-3 반복단위당 양전하를 발생시키는 산화된 고분자이다. 보통 전기 전도도는  $10^{-2} - 10^3 \text{ S/m}$ 의 범위를 가지며 비록 기계적 성질은 변하지만 변화 사이클에도 본래의 모습을 유지하며 산화 환원에 따라 여러 가지 성질이 변하기 때문에 응용 가능성 또한 높다. 그 밖에 PTh을 이용한 단일 고분자 체인이 변형을 일으키는 molecular EAP, 탄소나노튜브를 이용한 액추에이터 연구도 활발히 수행되고 있다.

### 3.2 전기 활성 고분자 복합재의 전극

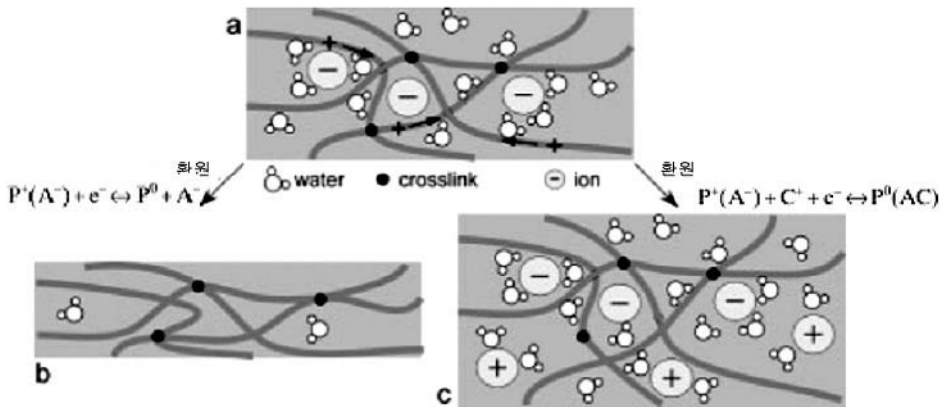


그림 5. 전도성 고분자의 작동원리



전기 활성 고분자 복합재의 전극으로 주로 이용된 소재로는 백금, 금, 은, 팔라듐 등의 귀금속을 들 수 있다. 이러한 금속 전극은 고가이며, 복잡한 도금 과정에 따라 전극과 작동기 성능의 재현성 등에 문제점이 있었다. 특히 금속 전극은 굽힘 등의 변형거동을 통해 결정입계의 균열이 발생하게 되어 전도도 감소 및 전해액의 휘발을 통해 성능 저하를 격게된다<sup>[8]</sup>. 또한 큰 강성을 갖는 금속 전극층은 대변형 작동기의 변형량을 저해할 수 있으며, 일반적으로 2~10 $\mu$ m의 두께를 갖는 전극층의 불투명도는 이들 작동기의 광학적 응용에 제한 조건이 된다.

최근에는 이러한 금속 전극을 대신하여 다양한 전도성 고분자들을 전기 활성 고분자 복합재의 전극으로 이용하려는 연구가 보고되고 있다<sup>[9]</sup>. 전도성 고분자를 이용한 전극은 금속보다 더 큰 변형을 견딜 수 있다는 장점을 가지고 있지만, 높은 온도에서 전도도가 급격히 감소되는 문제점을 가지고 있어서 그 이용이 제한되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 투명하면서도 높은 전도성을 가지는 단일벽 탄소나노튜브(single-walled carbon nanotubes, SWCNT) 필름 기반의 전극이 최근에 개발되었다<sup>[10]</sup>. 유기용매에 SWCNT를 분산시키고 anodized alumina membrane에 필터를 해서 만들어진 탄소나노튜브 전극은 고온에서도 높은 전도도(280S/cm)를 유지하며 IPMC 작동시 높은 변위(electric field-induced strain 240%)를 기록하였다. 그림 6은 SWCNT를 이용한 IPMC의 제작 과정과 SWCNT 전극을 보여준다.

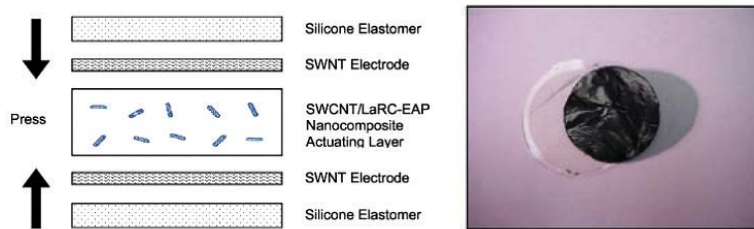


그림 6. SWCNT를 이용한 IPMC 작동기의 제작 과정 및 SWCNT 전극

또한 카이스트에서는 우수한 광 투과도와 전도성을 갖는 투명 그래핀(graphene) 전극을 사용하여 IPMC 작동기를 제작하고 그 성능을 평가하였다<sup>[11]</sup>. 투명 그래핀 전극은 Thermal CVD 방법을 이용하여 약 1000 $^{\circ}$ C의 고온에서 메탄, 수소 혼합가스를 구리(25 $\mu$ m thick Cu foil) 촉매층에 반응시켜 적절한 양의 탄소를 촉매층에 흡착시켜 제조하였고, roll-to-roll 방법을 이용하여 전극을 이온성 고분자 양면에 전사하였다. 또한 투명 그래핀 전극의 전기전도도를 향상시키기 위해 무전해도금(Pt)과 스퍼터링(Au, 약 10nm)으로 추가 적층하는 방법을 도입하였다. 투명 그래핀 필름으로 제작된 IPMC 작동기의 사진이다. 하지만 그래핀을 이용한 전극은 아직 금속 전극정도의 높은 전도도를 보여주지 못하고 있다. 이에 지속적으로 투명 전극의 투명도를 유지하면서 전기전도도를 향상시킬 수 있는 기법을 개발하고 이를 고분자 작동기에 적용하여 우수한 작동성능의 투명 IPMC 작동기의 개발 및 응용 연구를 수행하고 있다.

### 3.3 전기 활성 고분자 복합재의 센서 및 액추에이터 응용

전기 활성 고분자 복합재를 이용한 대표적인 응용예로는 셀룰로오스 기반 EA Paper(EAPap)를 들 수 있다. 2010년 인하대에서 세계 최초로 개발된 셀룰로오스 기반 EAPap은 식물성 고분자인 셀룰로오스를 기반으로 한 전기 활성 고분자(electro-active polymer, EAP)의 일종으로 전기적인 신호에 반응하여 기계적 변형을 일으키는 천연 고분자 물질로, 인장 변형률 및 굽힘 변형률을 측정하는 센서 및 액추에이터로의 응용 가능성을 확인하였다<sup>[12, 13]</sup>. 셀룰로오스 EAPap는 인장 응력을 천천히 가하였을 때 발생하는 유발 전류가 재료의 점탄성 성질로 인하여 비선형적으로 변하며, 자유진동에 대한 EAPap의 유발 전압 특성은 변형에 비례하는 결과를 얻었으며, 이는 셀룰로오스 EAPap가 환경 친화적인 변형을 센서로 응용이 가능하다는 것을 보여주고 있다. 또한 EAPap은 0.35V/ $\mu$ m의 낮은 전압에도 작동하고, 소모전력이 수 mW/cm<sup>2</sup>로 낮고, 길이 대비 약 10%의 굽힘 변형이 나오며, 30Hz까지 작동이 가능하다.



더욱이 EAPap은 특별히 수분을 공급하지 않고도 건조한 상태에서 장시간 동작할 수 있기 때문에 초소형 벌레 로봇, 초소형 비행체, 오락산업의 기구들과 같이 초경량, 대변형이 요구되는 응용분야에서 원격구동을 통해 소모전원을 탑재하지 않고 사용 가능한 초경량 EAP 액추에이터에 대한 응용 가능성을 보여주었다.

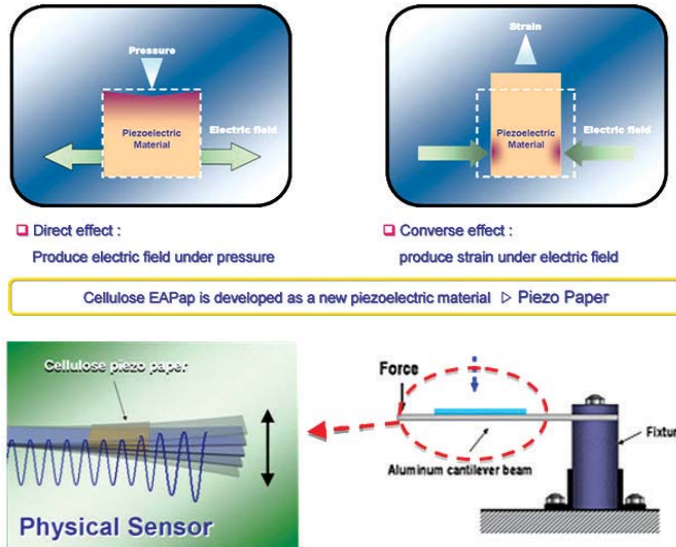


그림 7. 셀룰로오스 기반 EAPap의 센서 응용

전기 활성 고분자 복합재는 외부의 자극에 따라 큰 변위를 생성할 뿐만 아니라 생체 근육과 같이 탄성이 뛰어난 다른 종래의 소재들이 발현할 수 없는 특성을 가지고 있기 때문에 인공 근육 분야에도 활발하게 응용되어 왔다. 외부의 전기신호를 받으면 특별한 부품조합 없이 자체의 부피나 길이가 변화하는 전기 활성 고분자는 생체근육과 유사한 소재특성(유연성, 탄성, 밀도, 낮은 소비전력, 소형화 가능성 등)으로 인해 기존의 기계적 구동체를 대체할 인공근육 소재로서 관심을 끌고 있다. 특히 낮은 전압에서 생체근육과 유사한 20% 이상의 변형률을 지닐 수 있는 효율적인 구동 재료는 아직 전기 활성 고분자 소재 이외에는 알려진 바 없다<sup>[5]</sup>. 생체근육의 구동력 및 수축, 이완율과 가장 유사한 재료로 알려져 있는 전도성 고분자의 경우, 우수한 생체적 합성과 성형성을 바탕으로 한 바이오메디컬 분야와 MEMS 분야 등에 응용하기 위하여 일본, 스웨덴, 미국 등 각국의 많은 그룹에서 연구를 진행하고 있다. 최근 일본의 벤처기업 이맥스에서 전도성 고분자를 근육 섬유로 제작, 수천개 단위의 소자를 복합화하여 지름 40mm 다발에서 15%의 신축과 500N의 구동력을 구현한 사례가 보고된 바 있다.

미국항공우주국(NASA)의 제트추진연구소(JPL)가 주도적으로 연구하면서 알려지기 시작한 이온성 고분자-금속 복합체(Ionic Polymer-Metal Composite, IPMC)는 수분이 함유된 이온교환막과 양 표면에 증착된 금속전극으로 이루어져 있으며, 수 볼트의 전압 인가에 의한 이온 및 수분의 이동으로 우수한 굽힘 변형이 일어난다. 이는 낮은 전력에서 높은 에너지 효율을 가지며 실제 사람 근육, 변형률, 탄성률 등이 유사하여, 인공 손가락, 인공 심장, 인공 피부 및 안구 등 재활·보조 산업을 위한 생체모방형 인공근육 소재로의 응용 가능성이 매우 크다. 내부 수분함량의 존성, 재료의 유연함에 기인한 낮은 구동력, 체내/외 임상에서의 안정성 테스트 등 해결해야 할 과제가 남아 있지만 다른 EA 소재에 비하여 상대적으로 매우 섬세하고 유연한 구동이 가능하므로 연구 개발의 가치가 매우 높다. NASA에서는 1990년대 초부터 소형우주탐사 로봇의 핵심 부품 소재로 IPMC를 연구한 결과 집게, 와이퍼, 초경량 비행체의 날개 등의 소재로 IPMC를 적용하였다. 특히 수분을 함유하고 있는 IPMC의 특성상 물 속에서 더욱 안정적인 구동이 가능하므로 해양탐사를 위한 소형 로봇도 제작중이며, 일본 이맥스와 다이치 고게이사가 공동 개발한 EA 소재

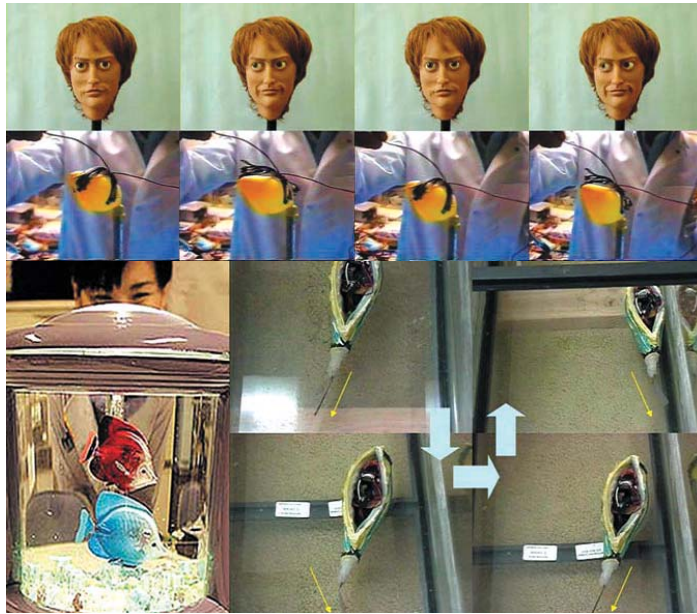


그림 8. IPMC 액추에이터를 이용한 인공안구, 인공심장 및 수중 로봇의 응용<sup>[14]</sup>

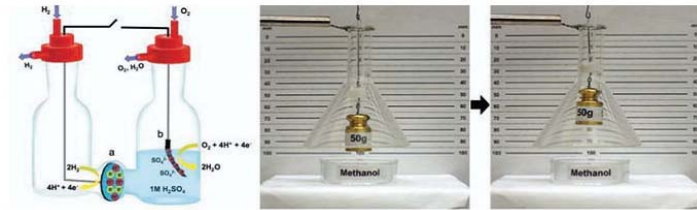


그림 9. 자가 에너지 발전형 CNT 인공 근육<sup>[15]</sup>

분야 최초의 상업적 제품인 장난감 ‘로봇 물고기’가 시판된 바 있다.

대부분의 이온성 전기 활성 고분자는 낮은 구동력 때문에 강하게 발생하는 힘을 필요로 하는 분야의 적용에 한계가 있는데, 최근에는 CNT를 이용하여 이를 극복하는 연구가 진행되고 있다. CNT는 인공근육 소재로 활용 가능하며, 낮은 전압에서도 수 테라파스칼의 높은 탄성률을 지녀 생체근육보다 센 힘을 만들 수 있다고 보고된 바 있다. 생체근육보다 수축력이 약 100배 정도 강하고 화학적으로 안정적인 동력공급이 가능한 CNT 섬유를 개발함으로써, 강한 구동력 구현뿐만 아니라 탄소 나노튜브의 긴 피로 저항 특성에 기인한 내구력이 한층 강화된 인공근육 개발이 가능하게 되었다. 즉, CNT를 인공근육과 연료 전지의 재료로 동시에 사용하여 스스로 에너지를 만들고 구동하는 자립형 인공근육이 가능하게 되었다.

#### 4. 맺음말

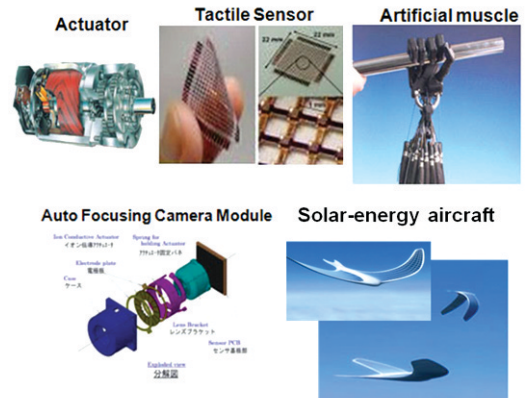


그림 10. 전기 활성 고분자 복합재의 응용분야

전기 활성 고분자 복합재는 IPMC 연구를 중심으로 개발된 나피온계 IPMC의 센서 및 액추에이터로의 구동 특성, 새로운 전기 활성 소재 개발에 대한 연구가 주를 이루어 왔으나, 전기 활성 고분자 복합재의 응용에 있어 안정성 및 내구성에 문제가 되고 있는 전극 및 보호막 소재에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 또한 기초소재설계부터 부품기반의 시스템 적용에 이르는 종합적인 연구도 전무하다. 따라서 새로운 전기 활성 소재, 백금 대체 고전도 대변형 전극소재, 기능성 초박형 계면, 저손상 및 환경친화적 보호막에 이르는 핵심소재의 개발과 함께 융복합화 기술 및 부품기반의 설계/해석/평가 기술과 유기적 결합하여 신개념의 전기 활성 고분자 복합재 센서 및 액추에이터의 개발이 가능하다. 이를 통해 국내뿐만 아니라 세계를 선도하는 기술의 확보가 가능하며, 인공심장, 스마트 피부, 초정밀기계, 센서/액추에이터, 개인군사 장비의 발전기, 의료용 로봇, 우주항공 분야, 연료전지, 펌프 등의 다양한 분야에 응용될 것으로 판단된다.

## ❁ 참고 문헌

- [1] 김재환, EAP 재료 및 응용, 기계저널, 44(6), 48-52 (2004)
- [2] 김성현 외, EAP를 이용한 청정 에너지 수확 기술 개발, 전자통신동향분석, 23(6), 22-31 (2008)
- [3] Y. Osada et al., A polymer gel with electrically driven motility, Nature, 355, 242-244 (1992)
- [4] Y. Bar-Cohen, Electroactive polymer (EAP) actuator as artificial muscles; reality, potential, and challenges, 2nd edition, chapter 1, 22-38
- [5] 조재영, '이온성 전기활성고분자'가 인공근육 시대 연다, 과학과 기술, 11월호, 62-65 (2007)
- [6] 김재환, Electroactive polymer (EAP)의 개발 및 응용기술 동향조사, 과학기술부
- [7] 이준호, 이두성, 김홍경, 이영관, 최혁력, 김훈모, 전재욱, 탁용석, 남재도, 전기활성 IPMC 구동기 제조 및 구동 특성 연구, Polymer (Korea), 26(1), 105-112 (2002)
- [8] K Park, M.-K. Yoon, S.B. Lee, J. Choi, M. Thubrikar, Effects of electrode degradation and solvent evaporation on the performance of ionic polymer-metal composite (IPMC) sensors, Smart Mater. Struct., 19, 07500201-13 (2010)
- [9] V.T. Truong et al., Enhanced thermal properties and morphology of ion-exchanged polypyrrole films, Polymer, 36, 1933-1940 (1995)
- [10] J. Kang et al., All-Organic Actuator Fabricated with Single Wall Carbon Nanotube Electrodes, J. Polymer Science Part B, 46, 2532-2538 (2008)
- [11] 오일권 외, 투명 전극 기반 고분자 작동기, 한국소음진동공학회 논문집, 제 181 권, pp. 395-396.
- [12] 장상동 외, 셀룰로오스 Electro-Active Paper (EAPap)를 이용한 변형률 센서, 한국소음진동공학회논문집, 19(9), 915-921 (2009)
- [13] Creative Research Center for EAPap Actuator, <http://www.eapap.com>
- [14] WorldWide Electroactive Polymer Actuators Webhub, <http://eap.jpl.nasa.gov/>
- [15] V.H. Ebron et al., Fuel-Powered Artificial Muscles, Science, 311(5767), 1580-1583 (2006)



이 상 복

- 재료연구소 융합공정연구본부 복합재료연구그룹  
선임연구원
- 관심분야 : 금속복합재료, 기능성 복합재료
- E-mail : leesb@kims.re.kr



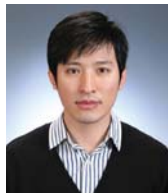
이 진 우

- 재료연구소 융합공정연구본부 복합재료연구그룹  
선임연구원
- 관심분야 : 고분자 합성, 고분자/탄소나노 복합재료
- E-mail : yjw0628@kims.re.kr



이 원 오

- 재료연구소 융합공정연구본부 복합재료연구그룹  
선임연구원
- 관심분야 : 탄소나노 복합재료, 변형/구동 해석
- E-mail : wonohlee@kims.re.kr



이 제 욱

- 재료연구소 융합공정연구본부 복합재료연구그룹  
선임연구원
- 관심분야 : 전도성 고분자, 고분자/탄소나노 복합재료
- E-mail : leeju@kims.re.kr



엄 문 광

- 재료연구소 융합공정연구본부 복합재료연구그룹  
책임연구원 (그룹장)
- 관심분야 : 기능성복합재료, 복합재료 성형기술
- E-mail : umk169@kims.re.kr