

# 전기 응답형 지능형 고분자(인공 근육)

정성엽

## 1. 서론

인공 근육(artificial muscle)은 인공적인 합성 재료를 이용하여 인간의 근육을 모방하고 이를 이용하여 기계적 동작을 하는 소자를 통칭하여 부르는 용어이다. 현대 사회에서 로봇(robot)은 다양한 분야에서 활용된다. 일부 외제차의 제작에서만 사용되던 100% 로봇공정이 기아자동차의 광주공장에서 이미 적용되고 있고 위험하고 복잡한 난치병의 수술 또한 로봇을 이용하여 정교하게 수행된다. 인간이 발자국을 남길 수 없는 곳은 하나도 없다고 여겨졌지만 21세기에 들어선 지금도 수천미터 이하의 심해와 달 이외의 행성 탐험에는 아직도 다양한 로봇이 인간을 대신하여 그 역할을 다해주고 있다. 이와 같은 다양한 로봇에는 다양한 기계적 장치들이 부착되어 있다. 최근 각종 첨단 센서와 인공지능으로 무장된 휴머노이드 로봇 등이 등장하여 사람들을 즐겁게 해주고 있고 로봇의 발전은 끝이 보이지 않을 정도로 하루하루 다르게 진행되고 있는 상태이다.

하지만 그 근원적 면모에서 로봇은 인간이나 다른 동물이 가지고 있는 근육 자체와는 작동 방식이 틀리다. 통상적으로 로봇은 모터의 회전력이나 압축공기의 압축/팽창력을 이용하여 동력을 여러 가지 부품에 전달하고 다양한 동작을 수행하게 된다. 하지만 현재에도 로봇춤이 그러하듯 로봇의 움직임은 무엇인가 부자연스럽고 인간의 움직임과는 많은 차이점을 가지고 있는 것이 현실이다. 이는 인간의 근육이 매우 섬세하고 정밀한 다양한 근육 운동을 할 수 있는 것에 반하여 로봇의 움직임이 단순한 회전과 수축/팽창을 다양한 기어를 사용하여 수행하는 것이기 때문이다. 따라서 최근에는 더욱더 정교하고 인간과 유사한 로봇을 제작하기 위하여 생체 근육을 모방한 다양한 인공 근육 시스템이 개발되고 있다. 본 총설에서는 다양한 고분자-이온 복합체를 이용하여 인공 근육 소재를 개발하고 이를 이용하여 다양한 인공 근육 시스템을 제작하는 연구를 고분자 재료적인 측면에서 설명하고자 한다. 현재 인공 근육 제작을 위하여 사용되고 있는 전기적 인공 근육 재료와 이온성 인공 근육 재료, 두 가지 분류하여 다양한 고분자 복합체가 어떻게 인공 근육 재료로서 사용되는지를 설명하고자 한다.

## 2. 인공 근육에 사용되는 고분자 재료

인공 근육에 고분자가 사용되기 위해서는 전기장이 가해졌을 때 실

질적으로 변형이 일어나는 것이 가장 중요한 핵심 요소이다. 다음으로 이와 같은 변형된 상태에서 다시 가역적으로 초기 상태로 완벽히 전환되는 것이 중요하다. 이와 같은 구동 방식은 근육의 원리와 유사한 것으로 전압이 가해졌을 때 길이나 부피에서 많은 변위를 나타내는 것은 우수한 고분자 인공 근육 소재라고 이야기할 수 있다.

인공 근육에 사용되는 고분자 재료를 설명하기 전에 용어의 정리가 필요하다. 실제 인공 근육 소재 중의 한 분류인 electroactive polymer (EAP)는 전기장에 의하여 재료의 면적 혹은 부피가 변화하는 소재로서 유기 발광(EL) 재료 분야의 연구에서도 종종 EAP라는 용어를 사용하기 때문에 혼선이 있을 수 있다. 최근 EAP는 인공 근육 분야에 주로 국한되어 사용되기도 하지만 아직도 많은 경우에 혼용되기 때문에 특히 분석과 같은 경우 혼선을 초래할 수 있다. EAP에 속하는 인공 근육 소재로서 dielectric actuator (DEA), relaxor ferroelectric polymers, 그리고 액정 고무를 포함할 수 있다. 다음으로 인공 근육 소재로서 구동시 이온이 필요하고 이와 같은 이온의 이동이 필수적인 인공 근육 소재가 있다. 이들 소재는 이온성 EAP라고 불리우는데 이온들이 이동을 해야하기 때문에 전해질의 사용이 필수적이고 전해질이 액체일 경우 wet EAP라고 불리운다. 그리고 전해질로서 고체 물질을 사용할 경우 아직 따로 분류되지는 않고 있으며 전도성 고분자를 사용하는 경우, 탄소 나노튜브(CNT)를 사용하는 경우, 그리고 이온성 고분자 금속 복합체(ionic polymer metal composite, IMPC)를 사용하는 경우 해당 물질의 이름을 인공 근육 소재로서 그대로 사용한다.

그림 1은 실제 포유류의 뼈 주변의 근육의 특성을 표시한 것이다. 실제로 본 총설에서 소개될 인공 근육 소재들을 생체내의 근육보다 더 우수한 성능을 보여주기도 한다. 이는 더 응답 속도가 빠르고 더



정성엽

1994 연세대학교 기계공학과(학사)  
 1996 한국과학기술원 기계공학과(석사)  
 2005 한국과학기술원 기계공학과(박사)  
 2005~2007 삼성중공업 메카트로닉스센터 책임연구원  
 2007~ 현재 충주대학교 기계공학과 전임강사

### Electroactive Smart Polymer(Artificial Muscle)

충주대학교 기계공학과 (Seong Youb Chung, Mechanical Engineering, Chungju National University, 72 Daehak-ro, Chungju-si, Chungbuk 380-702, Korea) e-mail : sychung@cjnu.ac.kr

Property	Typical value	Maximum value
Strain (%)	20	>40
Stress (MPa)	0.1 (sustainable)	0.35
Work density (kJ/m <sup>3</sup> )	8	
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1037	
Strain rate (%/s)		500
Power to mass (W/kg)	50	200
Efficiency (%)		40
Cycle life		10 <sup>9</sup>
Modulus (MPa)	10-60	

그림 1. 포유류의 뼈 근육의 특성들.


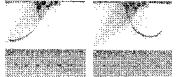




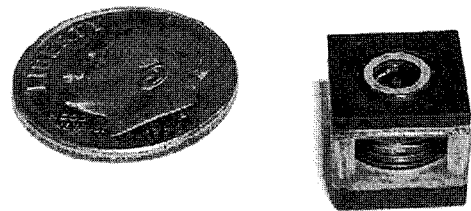
<p><b>EAMEX</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• EAP</li> </ul>	<p><b>Molecular Mechanisms</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bilayer CP EAP activated in air</li> </ul>
<p><b>Environmental Robots</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• IPMC</li> </ul>	<p><b>SRI International</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dielectric EAP</li> </ul>
<p><b>MCNC</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Artificial Cyelid</li> </ul>	<p><b>Santa Fe Sci &amp; Tech</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Panion CP EAP</li> </ul>

그림 2. 상업화된 다양한 인공 근육 소재들.

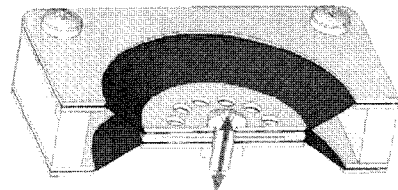
기계적 성능이 우수한 인공 근육 재료가 계속 개발되어 지고 있다. 현재 다양한 인공 근육 재료들이 그림 2와 같이 상업화되어 시판되고 있지만 활발하게 사용되기에는 아직 많은 연구가 필요한 실정이다. 다양한 고분자 재료가 어떻게 인공 근육 소재로서 사용되고 그 작동 원리를 이해한다면 고분자가 기여할 수 있는 인공 근육 관련 연구가 고분자 중심의 첨단 공학 분야가 되리라고 조심스럽게 예측해본다.

### 3. Electroactive Polymer(EAP)

인공 근육을 제작하는 가장 간단한 방법은 전극사이의 정전기적 반발을 이용하여 액츄에이터를 제작하는 것이다. 이와 같은 구동 원리는 낮은 modulus를 가지며 극도로 큰 strain(40% 이상) 값을 나타내는 dielectric elastomer에서 주로 구현된다. 두 번째 방법은 electrostrictive 고분자에서 관찰되어지는데 고분자 내부의 전기적 dipole들이 가해진 전기장 하에서 상호 반발하거나 혹은 끌어당김으로 인하여 변형이 발생하는 원리이다. 가장 높은 strain 값을 long range order를 방해하기 위하여 imperfection이 도입된 ferro-electric 고분자에서 관찰되어졌는데 paraelectric phase에 가해진 전기장이 고분자 주사슬의 conformation의 변화와 유도 dipole을 발생하여 약 7%까지의 큰 값의 strain을 발생하였다. 또한, 그래프트 공중합체의 결사슬이 결정성 영역을 형성할 경우와 액정 고무 고분



(a)



(b)

그림 3. DEA를 사용한 인공 근육으로 제작된 (a) 렌즈 positoner와 (b) 구동 모식도.

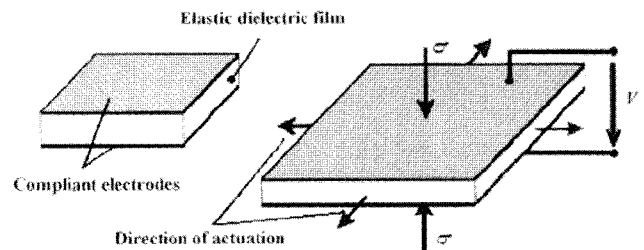
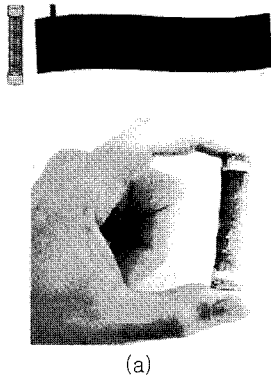
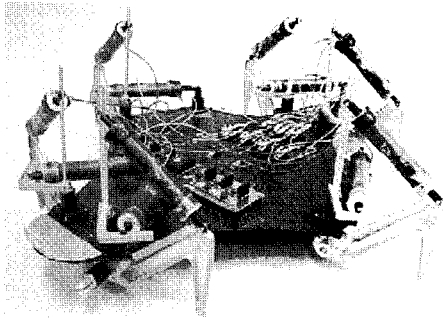


그림 4. DEA를 이용한 액츄에이션의 모식도.

자의 극성 그룹이 전기장에 의하여 정렬될 경우에도 실질적인 strain을 발생시키는 것으로 알려져 있는데 이와 같은 시스템들을 구동시키기 위해서는 약 1 kV에 이르는 높은 전압이 필요한 것으로 알려져 실제 사용에 많은 제약이 있을 것으로 여겨져 왔다. 최근 이와 같은 문제점을 극복하기 위하여 제작된 필름 소재의 두께를 최소화하거나 고분자 소재의 dielectric constant를 증가시키는 방법이 많이 사용되고 있는데 이들 소재는 실제 근육보다 수백배의 작업 밀도 (work density, KJ/m<sup>3</sup>)를 보여주기 때문에 구동 전압만 낮춰준다면 가장 높은 가능성이 있는 재료라고 고려된다. 특히 전기적으로 구동되는 인공 근육 시스템 중 dielectric elastomer actuators (DEAs)는 큰 strain과 큰 strain rate을 보여줄 수 있는 시스템이다. 고분자 인공 근육 재료 중에 가장 많이 연구된 시스템이 바로 이들 DEA 시스템으로서 electroactive pump, conformal skins for Braille screens, 곤충모양 로봇, 그리고 인공 근육 렌즈 positioner 등으로 사용되고 있다고 알려져 있다. 특히 렌즈 positioner로 활용될 경우 camera의 lens를 350 um 정도 움직이면서 초점을 맞출수 있다고 알려져 있다(그림 3). DEA를 이용한 액츄에이션 과정은 그림 4에 나타내었다. 두 개의 전극사이에 elastic dielectric 필름을 위치시키고 위와 아래의 전극에 전압을 걸어줄 경우 Maxwell stress가 형성되고 dielectric 필름이 압축되어 결과적으로 필름면에서의 확장이 일어나는 원리이다. 최근 이와 같은 DEA 필름을 여러 층으로 쌓아올리거나 튜브형태로 만들어서 더 큰 힘을 발생시키는 연구가 진행되어 이를 이용한 곤충모양의 로봇이 그림 5와 같이 제작되어 발표되기도 하였다. 이외



(a)



(b)

**그림 5.** DEA 필름을 말아서 만든 스프링롤을 이용하여 제작된 인공 근육 로봇.

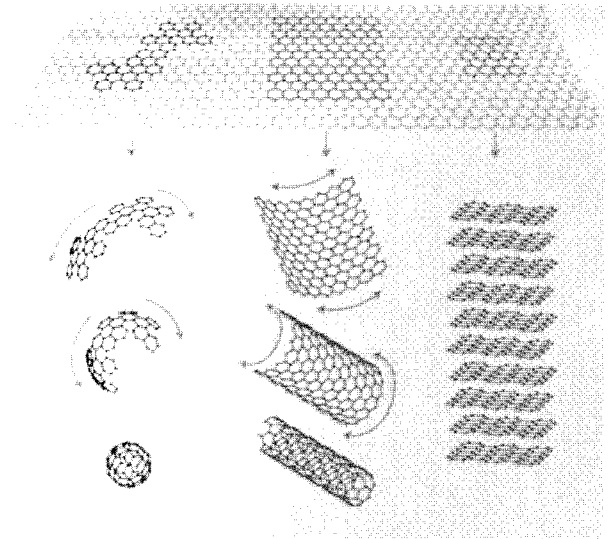
에 PVDF (poly(vinylidene fluoride), PVDF) 계열의 공중합체와 같은 electrostrictive relaxor ferroelectric 고분자를 사용하거나 액정 고무 중합체 등을 사용한 인공 근육 소재도 발표되었다.<sup>1</sup>

#### 4. Ionic Electroactive Polymer(Ionic EAP)

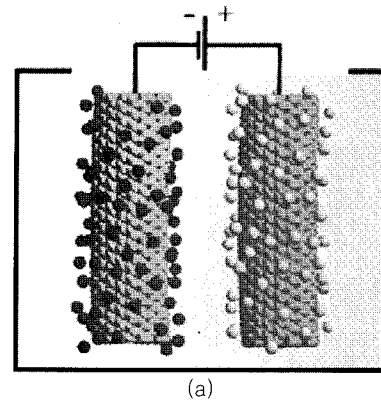
고분자 재료가 외부 전기장에 의하여 변형을 일으키는 다른 한 가지 방법은 고분자 내에 이온을 주입하고 이들 이온이 전기장을 가할 경우 고분자 내부에서 이동함으로써 이온이 주입된 고분자 부분이 팽창하고 이온이 결핍된 고분자 부분이 수축하는 원리를 이용하는 것이다. 전도성 고분자나 CNT의 경우와 같이 고분자 상이 전기적으로 전도성일 경우 이온들은 전기장이 변화함에 따라 전도체에 발생한 전하를 보상하는 역할을 하게 된다. 이와 같은 이온성 인공 근육 재료들은 구동 전압이 아주 낮음에도 불구하고(1~7 V) 이온들과 전기 전하들 간의 밀착성이 높고 가용할 수 있는 전하와 이온의 수가 높기 때문에 아주 높은 구동력을 보일 수 있다고 알려져 있다.

##### 4.1 탄소나노튜브

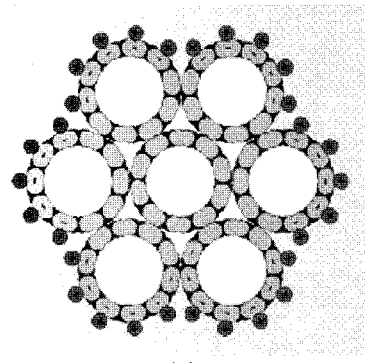
단일벽 탄소나노튜브(SWNT)는 **그림 6**과 같이 평면 구조의 graphene이 동그랗게 말려있는 형태로 생각할 수 있다. 또한 다중벽 탄소나노튜브(MWNT)는 여러개의 SWNT가 계속 양과껍질처럼 겹겹이 쌓여있는 구조이다. 이들 탄소나노튜브는 개별 단위로 존재할 경우에 아주 높은 기계적 물성을 보여주는데 SWNT의 tensile modulus는 약 640 GPa 정도로서 다이아몬드와 유사하다고 알려져 있으며 tensile strength는 약 20에서 40 GPa 정도로 통상적인 섬유보다 수십 배 정도로 큰 것으로 보고되고 있다. 하지만 탄소나노튜브는



**그림 6.** 탄소나노튜브의 모식도.



(a)



(b)

**그림 7.** 탄소나노튜브를 이용한 인공 근육 시스템의 제작. (a) 탄소나노튜브전극의 전하 충전, (b) 탄소나노튜브 표면의 전하 주입.

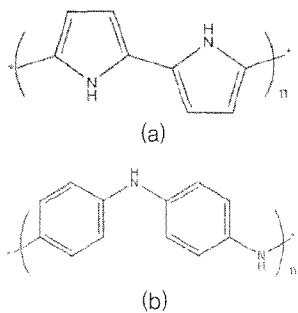
뭉쳐서 assembly 형태로 존재할 경우 위에 보고된 기계적 성능보다 현저히 낮은 물성을 보여주는데 따라서 인공 근육을 위한 actuator로서 사용하는 것에는 많은 제약이 있어왔다. CNT에 많은 양의 전하가 주입될 경우 DEA와 유사하게 아주 강한 electrostatic force를 발생한다. 그러나 이와 같은 힘은 두 전극 사이에서 발생하는 것이 아니라 전하가 나노튜브 표면에 주입되어 발생하는 상호반발력이 대부분이다. 이온을 함유하는 용액에 **그림 7**과 같이 액츄에이터로 작용하는 탄소나노튜브 전극과 카운터 탄소나노튜브 전극 사이에 전기장을

걸어주면 액츄에이터 전극에 전하를 충전시키게 된다. 이후 액츄에이터 전극의 탄소나노튜브 표면의 유사한 전하들의 상호 반발력은 나노튜브에 존재하는 강한 탄소-탄소 결합을 길어지게 하고 나노튜브를 팽창시킨다. 액츄에이션은 여러개의 탄소나노튜브를 엮어 놓은 상태 혹은 탄소나노튜브 필름 형태로 진행된다. 탄소나노튜브 소재의 다공성으로 인하여 아주 빠른 이온 전달이 가능하고( $<10$  ms) 19%의 effective strain rate을 보여준다고 알려져 있다. 질량 대비 파워는 약  $270$  W/Kg으로 일반적인 전기 모터 값의 절반 가량으로 우수한 것으로 알려져있다. 특히 주목받는 것은 탄소나노튜브를 사용한 인공 근육 소자의 에너지 밀도가 여러 가지 인공 근육 소재 중 가장 우수하다는 것이다. 약  $10^8$  J/m<sup>3</sup>의 에너지 밀도를 보여주는데 이것은 생체 근육의 약 만배의 값에 해당하는 우수한 성능이다. 하지만 이와 같은 값을 달성하기 위해서는 탄소나노튜브가 극단적으로 길어야하고 아니면 전체가 서로 경화되어야 하는데 이 경우에 나노튜브 소재의 기계적 물성이 개별 SWNT의 물성 값에 근접한다고 알려져 있다. 이와 같이 경량의 높은 에너지밀도와 공기중에서  $450$  °C 이상에 이르는 구동 온도 범위는 탄소나노튜브를 우주항공 등의 분야에서 최적의 인공 근육 소재로 손꼽히게 한다. 다만 탄소나노튜브의 경직성에 기인한 2% 이하의 낮은 strain은 탄소나노튜브 인공 근육 시스템의 응용이 제한적일 수 밖에 없다는 문제점을 보여준다.

#### 4.2 전도성 고분자

전도성 고분자는 일반적으로 도핑없이 반도체적 성질을 나타내고 donor나 acceptor 이온으로 도핑을 할 경우 전도성으로 변화하게 된다. 도핑 과정은 화학적으로 혹은 전기화학적으로 가능하며 이와 같은 원리를 이용하여 전기발광 다이오드, electrochemical window, 에너지 저장, sensing, 그리고 인공 근육 소재로의 활용이 가능하다. 특히 **그림 8**에서와 같이 폴리피롤과 폴리아닐린은 대표적인 두가지 전도성 고분자로서 이를 인공 근육 소재로서 활용하는 연구가 널리 시도되었다. 이 경우에 인공 근육에서 전도성 고분자는 전기화학적으로 이온이 고분자 내부로 주입되거나 방출됨으로 인하여 길이와 면적의 변화를 일으키게 되며 보통 이와 같은 과정은 용매 분자를 같이 수반하기도 한다. 이 경우 두개의 전극 모두 전도성 고분자를 사용하면 둘다가 인공 근육으로 이용된다. 팽창과정은 주로 배향된 고분자에 대해서는 고분자의 주사를 배향에 수직 방향으로 일어나는데 이는 **그림 9**와 같이 용매에 의하여 둘러싸인 이온이 산화환원 과정에서 고분자 주사들 사이에 위치하게 되기 때문이다.

통상적으로 strain은 약 2에서 10% 정도로 비교적 큰 값을 나타내고 최근 Kanto 그룹에서는 40%에 육박하는 높은 값을 구현한 것으로 보고되고 있다. 전도성 고분자가 기존의 EAP에 비교하여 가지는

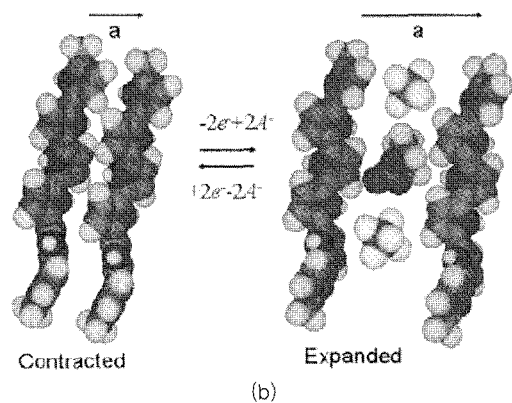
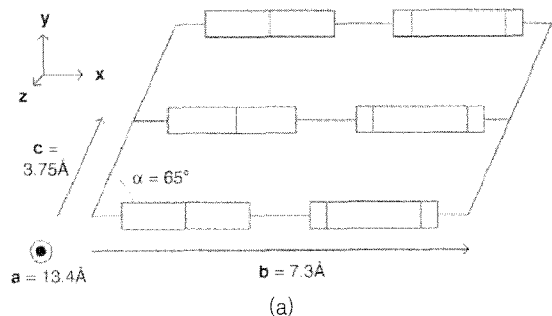


**그림 8.** 전도성 고분자인 (a) 폴리피롤과 (b) 폴리아닐린.

장점은 구동전압이 낮다는 것이다. 또한 탄소나노튜브보다도 더 높은 strain을 보여주면서 더욱 저렴하기 때문에 차세대 인공 근육 소재로서 많은 기대가 있는 상황이다.

#### 4.3 Ionic Polymer-Metal Composite(IPMC)

IPMC의 경우 인공 근육의 제작은 이온 전달층으로 사용되는 고분자 전해질을 이용한다. 고분자 주사들은 한가지 형태의 이온을 제공하고 유동성인 수화된 이온이 반대 전하의 이온을 제공하며 구동되는 원리이다. 주로 고분자 전해질은 표면적이 넓은 두개의 flexible 고체 전해질 사이에 샌드위치된 구조이며 금속 전극으로는 주로 백금 나노입자나 금을 사용한다. **그림 10**과 같이 두 전극 사이에 전압이 가해지면 수화된 양이온은 반대 전하를 띠는 음극으로 이동하고 따라서 음극은 팽창이, 양극은 수축이 전극 표면 주위에서 일어난 다음 결과적으로 전체가 휘어지게 된다. 고분자 전해질은 주로 불소가 많이 치환된 고분자 주사들 구조에 이온성 그룹인 황산 그룹( $-SO_3^-$ , Nafion의 경우) 혹은 탄산 그룹( $-COO^-$ , Flemion의 경우)이 도입된 구조가 많이 사용된다. 또한 styrene/divinylbenzene 공중합체 기반에 이온성 그룹이 phenyl 링에 도입된 구조 또한 많이 사용되는 고분자 전해질의 형태이다. 연료전지에서 사용되는 다른 separator 필름 또한 IPMC로서 많이 이용되고 있다. 고분자 전해질에서 이온성 그룹들은 극성 용매와 유동성 이온이 축적된 친수성 클러스터를 형성한다고 알려져 있다. IPMC에서 이들 클러스터는 소수성 고분자 주사들에 의하여 둘러싸여 있게 되고 친수성 영역의 채널화를 통하여 이온과 용매가 용이하게 이동하여 구동하게 되는 원리이다. Nafion을 사용한 경우 단계형으로 전압이 가해지면 초기에 빠른 액츄에이션이 일어나고 반대방향으로 잠시 안정화가 진행된다고 알려져있다. 반대로 Flemion을 사용한 인공 근육 시스템에서는 초기의 액츄에이



**그림 9.** 인공 근육 시스템에서 폴리피롤의 (a) 가상 구조와 (b) 이온 주입 메커니즘.

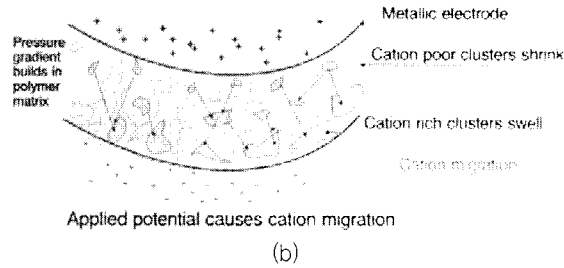
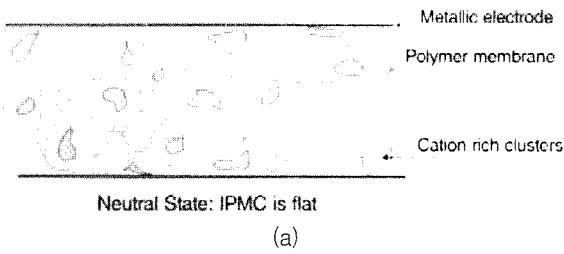


그림 10. IPMC 기반의 인공 근육 소재의 모식도 (a) 전압을 걸기 전, (b) 전압을 건 후.

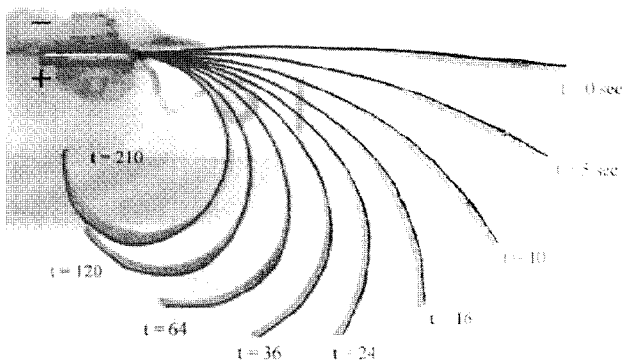


그림 11. 시간에 따른 IPMC 기반의 인공 근육 소재의 구동(Flemion 사용).

선과 안정화 액츄에이션이 동일한 방향으로 일어난다고 알려져 있다. 이것은 Nafion의 황산 이온과 Flemion의 탄산 음이온이 양이온에 대한 서로 다른 상호작용력을 가지고 있기 때문으로 알려져 있다. 액츄에이션 strain은 통상적으로 3% 이상으로 알려져 있으며 구동전압은 7 V 이하를 나타낸다고 알려져 있다. 주로 구부러지는 동작이 IPMC를 이용한 인공 근육 시스템에서 가능하며 최대 stress는 30MPa 정도로 알려져 있다. 특히 IPMC가 다른 인공 근육 소재에

비하여 보여주는 장점은 다공성인 고분자 전해질의 특성 때문에 이온의 이동이 용이하여 그림 11과 같이 비교적 빠른 속도로 인공 근육의 구동이 가능하다는 점이다. 또한 100 Hz 정도의 높은 속도로 액츄에이션이 가능한 IPMC 기반의 인공 근육 시스템이 발표되었다. 빠르게 인공 근육이 작동되어야 하는 분야에서 IPMC를 사용한 인공 근육이 폭넓게 사용되어지리라 생각된다.

## 5. 결론

다양한 고분자 재료를 이용하여 많은 형태의 인공 근육을 제작하는 연구는 이미 폭넓게 진행되어 고분자 기술의 한 분야를 차지하고 있다. 특히 최근 주목할 인공 근육 연구는 분자 수준의 기계나 분자집합체를 사용한 인공 근육으로 통상의 인공 근육 재료가 전기 에너지에 의하여 구동되는 것에 반하여 빛과 화학적 에너지 등의 다양한 형태의 에너지원을 사용하는 것으로 주목을 받고 있다. 분자 기계로 구동 가능한 strain은 약 25% 내외라고 여겨져서 조만간 기존의 인공 근육 재료의 좋은 라이벌이 되리라 생각한다. 인공 물고기, 인공 곤충 등 흥미위주의 다양한 인공 로봇이 인공 근육을 통하여 제작되고 있고 사람의 인공 근육을 모방하는 형태의 인공 로봇 시스템 또한 제작되고 있다. 아직 다양한 인공 근육 재료의 연구에서 그 효율성에 대한 검증이 끝나지 않았지만 현재 개발된 다양한 나노 기술과 고분자 재료 기술은 조만간 인공 근육 분야에서 접목되어 생체내의 근육을 뛰어넘는 정밀한 근육의 제작이 가능해 질지도 모른다. 인공 근육이 폭넓게 활용화될 향후 시대에 어떠한 인공 근육 소재가 살아남을지 또한 사라져갈지를 유추해보는 것도 의미가 있겠다. 또한 지금 우리가 꿈꾸지 못하는 어떤 응용이 가능할 지를 기대해 보는 것도 흥미있는 이야기가 될 수 있겠다.

## 참고문헌

1. M. Zhang, *et al.*, *Science*, **309**, 1215 (2005).
2. C. Huang, *et al.*, *Nature*, **410**, 447 (2001).
3. V. H. Ebron, *et al.*, *Science*, **311**, 1580 (2006).
4. J. D. Madden, *et al.*, *Science*, **311**, 1559 (2006).
5. M. J. Marsella, *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.*, **124**, 12507 (2002).
6. T. Mirfakhrai, *et al.*, *Materials today*, **4**, 30 (2007).