

2 인공 근육

‘이온성 전기활성고분자’가 인공근육 시대 연다

글 | 조재영 _ 서울대 화학생명공학부 교수 jyjho@snu.ac.kr

2005년 3월 7일 오후 미국 샌디에이고의 한 학회 논문발표장에서 의사들을 한쪽으로 치우고 팔씨름 대회가 벌어졌다. 제1회 생체근육-인공근육 팔씨름대회가 열린 것이다. 펌프 등의 기계장치를 사용하지 않은 인공근육으로 출전 자격이 제한된 대회에 당시 17세의 여고생 파나 펠슨 양의 상대로 세 연구팀이 인공 근육 팔을 출전시켰다. 그 결과는 이 글의 말미에 밝힌다.

현대과학기술의 발전은 최근 ‘참살이 트렌드’의 확대와 더불어 질 높은 삶을 추구하는 인간의 끊임없는 욕구에도 부응하는 방향으로 발전하고 있다. 특히 장애인의 자립, 나아가 동작회복의 기회를 넓혀주는 재활공학 및 보조공학의 발전도 첨단 기술을 응용하고 있다. 하지만 현재 장애인용 인공 의수·의족으로 적용하는 최신식 전자동 재활 보조 기구들은 금속 또는 경질 재료로 만들어지며, 유압 펌프나 모터로 작동하는 기계식 로봇에 가까운 것이 현실이다.

무거운 모터와 보조 장치 때문에 매일 무거운 바벨을 들고 생활하는 기분이고, 섬세한 힘 조절이 어려워 항상 구겨진 종이컵에 커

피를 마시며, 여성이나 어린이들의 경우 힘이 부족하여 보호자 없이 외출을 즐기지 못할뿐더러 화장실 출입도 원활하지 못하다고 생각해 보자. 실제 사람의 근육처럼 가볍고 유연하며 섬세하게 자유자재로 움직일 수 있는 인공근육 소재의 개발이 없다면 미래에 우수한 의료적 처치와 첨단 기기의 개발에도 불구하고, 세상과 단절돼 고통 받는 장애인들의 삶을 극복하기에는 한계가 있을 것이다.

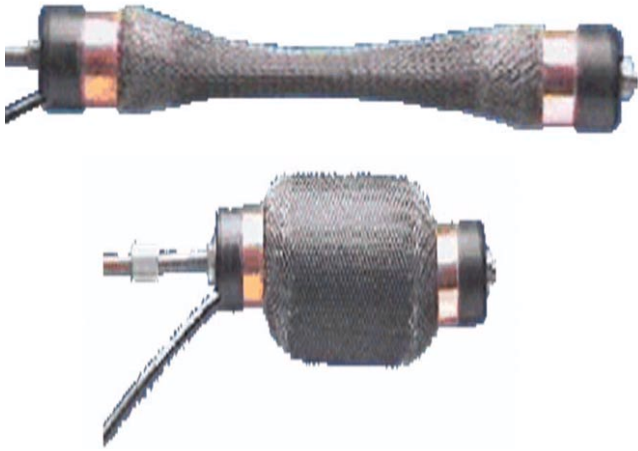
그러나 pH에 감응하여 수축현상을 보이는 인공섬유가 개발된 1950년 이래, 수십 년 이상 꾸준히 연구되어온 인공근육 기술은 최근 간단한 전기신호에 의하여 적절하게 수축과 이완을 할 수 있는 전기활성 고분자(EAP)의 등장으로 새로운 가능성을 열게 되었다. EAP의 등장과 이를 이용한 생체모방 소재 기술의 성장에 힘입어 맞춤형 재활·보조 기구로 활용될 수 있는 능동형 인공 팔, 인공 관절, 인공 안구, 인공 손가락 등이 실용화되는 EAP 인공근육의 시대가 도래하고 있다.

전기활성 고분자(EAP)로 생체근육 모방

생체근육은 액틴이라는 가는 섬유와 미오신이라는 굵은 섬유로 이루어진 무수한 단백질 다발로 구성되고, 몸이 보내는 전기신호에 따라 섬유가 교대로 미끄러져 전체 다발의 수축·이완을 반복 유도하여 적절한 부피 변형과 파워를 만들어 내는 메커니즘을 가지고 있다. 현재 생체근육의 구조와 기능을 재현할 수 있는 인공근육은 개발되어 있지 않지만 생체근육을 최대한 모방하여 기능적으로 대체하려는 생체모방형 인공근육에 대한 연구가 진행되고 있다.

현재 생체근육에 필적하거나 발생하는 힘의 측면에서 오히려 우수한 생체근육 대체용 구동 수단으로는 전기적 모터, 유압실린더, 공압근육 같은 기계식 기구 정도다. 고무튜브 내부의 압축공기





Mckibben 형 공기근육

(0~6bar)의 조절에 의하여 수축과 팽창 구동을 보여주는 매키벤형의 선형 공기근육의 경우, 작고 가벼우면서도 중량에 대한 파워비가 약 400 정도로 우수한 파워를 지녀 지금까지 대표적인 기계적 구동 수단으로 고려되어 왔지만, 공기 압축의 미세한 조절 한계와 공기압축기, 공기저장수단 같은 필수 부대장치는 공압식 인공근육의 실용화를 어렵게 하고 있다. 또한 생체근육처럼 정밀한 구동 메커니즘을 구현할 수 있는 기계적 모터의 경우 로봇의 보편화된 핵심 부품으로 각광받고 있지만, 구동이 정밀해질수록 내장되는 모터의 수가 기하급수적으로 증가하고 감속기, 제어 센서 등과의 종합적인 시스템적 접근이 필요하므로 인공근육으로의 접근은 더디기만 하다.

반면 외부의 전기신호를 받으면 특별한 부품조합 없이 자체의 부피나 길이가 변화하는 EAP는 생체근육과 유사한 소재특성(유연성, 탄성, 밀도, 낮은 소비전력, 소형화 가능성 등)을 지니면서 기존의 기계적 구동체들을 대체할 만한 가능성이 높아 인공근육 소재로서 관심을 끌고 있다. 사실 실제 생체근육과 구조적인 측면에서는 유사성이 없지만, '근육 세포간의 전위차로 유도되는 생체신호의 전달'이라는 생체근육의 구동 원리 측면에서 볼 때, 전기신호의 조절로 생체근육과 유사한 구동을 구현할 수 있는 EAP는 생체모방형 인공근육 소재로 충분한 가능성이 있는 것으로 평가받고 있다.

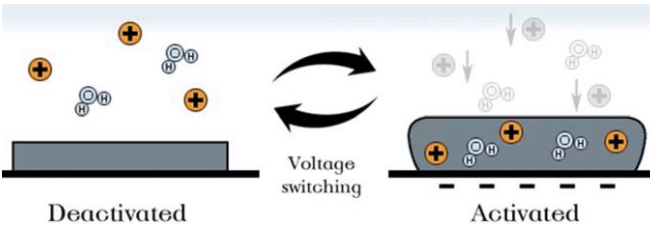
EAP 이외에 재료 자체의 부피변화가 유도 가능한 물질이 전혀 없는 것은 아니다. 재료에 기계적 변형을 줄 때 전압이 발생하고, 반대로 전압을 인가할 때 변형이 유도되는 압전 재료가 대표적이다. 1880년 마리 퀴리와 피에르 퀴리에 의하여 이러한 현상이 보고

된 이후, 최근 비교적 낮은 전압에서 큰 힘이 유도되는 PZT 같은 세라믹 재료와 작은 변형에 큰 전압이 유도되는 PVDF 같은 고분자 재료 등이 개발되고 있다. 하지만 EAP에 비하여 상대적으로 변형이 매우 작고 에너지 효율이 상대적으로 낮으므로, 생체모방형 인공근육으로서는 그 가치가 높지 않다. 그 밖의 수많은 전기활성 물질들이 보고되고 있지만, 낮은 전압에서 생체근육과 유사한 20% 이상의 변형률을 지닐 수 있는 효율적인 구동 재료는 아직 EAP 이외에는 없다. 인공근육 소재를 위한 대표적인 후보 물질로 평가되는 형상기억합금과 전기활성 세라믹의 특성을 EAP와 비교한다면, 왜 수많은 과학자들이 EAP의 등장에 열광하는지를 쉽게 알 수 있을 것이다.

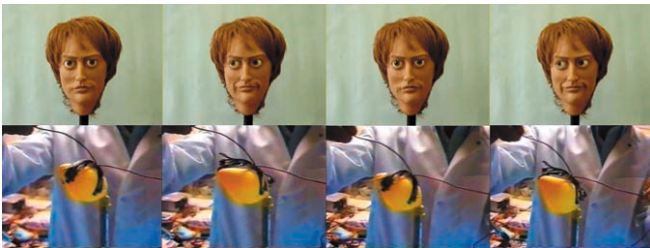
외부 전기 에너지에 의해 기계적 변형이 유도되는 EAP는 크게 내부 이온의 이동으로 활성화되는 이온성 EAP와 전기장에 의하여 활성화되는 비이온성 EAP로 분류할 수 있다. 각각의 구동 원리는 전기 에너지의 안정화를 고려한다면 간단히 이해할 수 있다. 전극의 전압 차에 의한 전하의 균형을 맞추기 위해, 고분자 내·외부에서 전해질에 존재하는 상대 이온들의 이동에 의하여 팽창과 수축이 일어나면 이온성 EAP, 두 전극이 서로 만나기 위해 그 사이의 물질을 압박하게 되고 이러한 분극에 의해 생성되는 쿨롱 힘에 의하여 변형이 일어나면 비이온성 EAP다. 각 구동은 소재의 특성에 기인하는데, 고분자 젤(gel), 전도성 고분자, 이온성 고분자-금속 복합체(IPMC), 탄소 나노튜브 등이 이온성 EAP, 압전 고분자, 유전 탄성체 등이 비이온성 EAP의 특성을 가지고 있다. 높은 전위차에 의하여 구동되며 기계적 성질과 구동력이 우수한 비이온성 EAP는 높은 내구력과 강한 발생 힘을 필요로 하는 산업용 및 군사용 로봇 등에 그 응용성이 높지만, 이온성 EAP에 비하여 소형화 휴머노이드의 부품이나 생체모방형 인공근육 소재로는 적합하지 않다.

전기활성고분자, 형상기억합금, 전기활성세라믹의 구동특성 비교

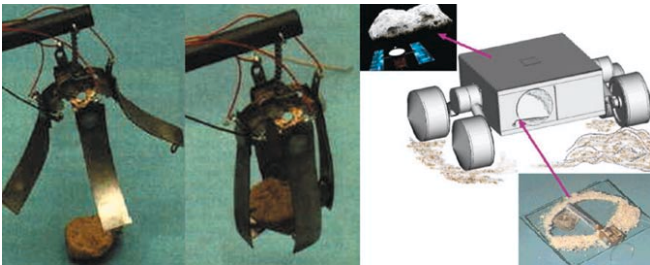
	EAP	SMA	EAC
구동변위	10% 이상	최대 8%	0.1 ~ 0.3%
구동력	0.1 ~ 3 MPa	최대 700 MPa	30 ~ 40 MPa
응답속도	msec ~ min	sec ~ min	msec ~ sec
밀도	1 ~ 2.5	5 ~ 6	6 ~ 8
구동전압	2 ~ 100 V	-	50 ~ 800 V
소모전력	mWatt	Watt	Watt



전도성고분자 구동체의 구동원리 (출처-사이언스)



IPMC 구동체를 이용한 인공안구와 인공심장 (출처-NASA JPL)



소형탐사로봇의 부품으로 사용될 수 있는 IPMC (출처-NASA JPL)

IMPC, 사람 근육과 변형률 · 탄성을 유사

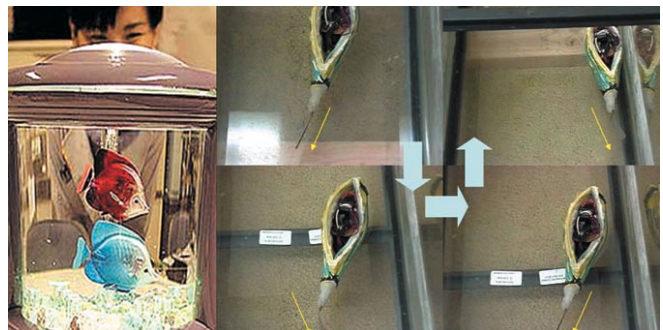
미국 애리조나대, 일본 신슈대 · 도쿄대 등에서 연구가 되고 있는 고분자 젤은 그 유연성에 기인하여 기어 다니는 곤충과 같은 생체모방 구동이 시도되고 있지만, 젤 자체가 부도체이므로 전극 연결에 문제점이 있으며, 동작 속도가 매우 낮아 인공근육 소재로 적용하기에는 한계가 있다.

반면에 생체근육의 구동력 및 수축 · 이완율과 가장 유사한 재료로 알려져 있는 전도성고분자의 경우 공액 이중결합으로 이루어진 분자구조 내부의 산화 · 환원 반응과 이온 도판트들의 출입에 의하여 부피 변화가 유도된다. 전도성고분자의 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 이맥스에서는 전도성고분자를 근육 섬유로 제작, 수천개 단위의 소자를 복합화하여 지름 40mm

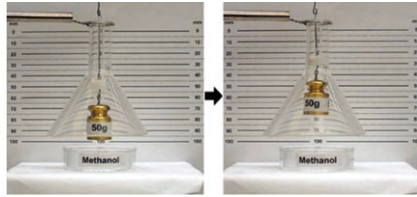
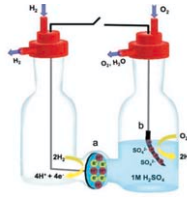
다발에서 15%의 신축과 500N의 구동력을 구현한 사례가 보고되어 조만간 강력한 힘을 구사하는 소형 로봇이나 전기활성 능동형 의족 등이 구체화 될 것으로 기대하고 있다.

미국항공우주국(NASA)의 제트추진연구소(JPL)가 주도적으로 연구하면서 알려지기 시작한 IPMC는 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 근육과 변형률과 탄성률 등이 유사하여, 인공 손가락, 인공 심장, 인공 피부 및 안구 등 재활 · 보조 산업을 위한 생체모방형 인공근육 소재로의 응용 가능성이 매우 크다. 내부 수분함량 의존성, 재료의 유연함에 기인한 낮은 구동력, 체내 · 외 임상에서의 안정성 테스트 등 해결해야 할 과제가 남아 있지만, 다른 EAP에 비하여 상대적으로 매우 섬세하고 유연한 구동이 가능하므로 연구 개발의 가치가 매우 높다. NASA에서는 1990년대 초부터 요셉 바-코언 박사의 진두지휘 아래 소형우주탐사 로봇의 핵심 부품 소재로 IPMC를 연구해 온 결과, 집게, 와이퍼, 초경량 비행체의 날개 등의 소재로 IPMC가 적용되었다. 특히 수분을 함유하고 있는 IPMC의 특성상 물 속에서 더욱 안정적인 구동이 가능하므로 해양탐사를 위한 소형 로봇도 제작중이며, 일본 이맥스사와 다이치 고게이사가 공동 개발한 EAP 최초의 상업적 제품인 장난감 ‘로봇 물고기’의 발매는 벌써 오래전 일이 되었다. 최근에는 IPMC의 역구동시 전류가 생성된다는 특성을 이용하여 파력 에너지를 전기에너지로 변환 가능한 신개념 부표가 연구되고 있다.

대부분의 이온성 EAP는 낮은 구동력에 때문에, 강하게 발생하는 힘을 필요로 하는 분야의 적용에 한계가 있다. 이는 탄소 나노튜브를 이용하여 극복할 수 있을 것으로 보인다. 미국 레이 바우만 교



수중 로봇에 적용될 수 있는 IPMC (출처-사이언스 올제)



근육을 움직이는데 필요한 에너지를 직접 생산해내는 탄소 나노튜브 인공근육 (출처-사이언스)

수는 1999년 사이언스지에서 탄소 나노튜브도 인공근육 소재로 가능하며, 낮은 전압에서도 수 테라파스칼의 높은 탄성률을 지녀 생체근육보다 센 힘을 만들 수 있다고 최초로 제시하였다. 이후, 미국 텍사스주립대에서 생체근육보다 수축력이 약 100배 정도 강하고 화학적으로 안정적인 동력공급이 가능한 탄소 나노튜브 섬유를 개발함으로써, 강한 구동력 구현뿐만 아니라 탄소 나노튜브의 긴 피로 저항 특성에 기인한 내구력이 한층 강화된 인공근육 개발이 가능하게 되었다. 또한 이 그룹에서는 최근 CNT를 인공근육과 연료 전지의 재료로 동시에 사용하여 스스로 에너지를 만들고 구동하는 자립형의 인공근육을 제안하였다. 탄소 나노튜브는 제공되는 수소와 공기 중 산소와의 반응을 돕는 연료전지의 촉매역할을 하여 전기를 만들었고, 이를 이용하여 활성 탄소 나노튜브의 수축력은 50g의 추를 쉽게 들어올렸다.

지금까지 살펴본 신개념의 인공근육들은 신체근육과 유사한 구동 메커니즘과 성능을 지니고 있다는 점에서 응용성뿐 아니라 학문적으로도 의미하는 바가 크다. 분자 수준에서의 조작과 섬유 다발 제조의 어려움 등의 문제들이 남아 있지만 이러한 기술적인 한계만 극복한다면, 재활·보조기로서의 인공근육 시대의 도래는 물론, '인공근육 전투복을 입고 성인의 10배 이상에 이르는 힘을 가질 수 있는 군인 양성' 계획이 600만 달러가 아닌 600달러로 실현될 날도 멀지 않아 보인다.

아직 끝나지 않은 생체근육과 인공근육 경쟁

2007년 8월 정부의 국가과학기술위원회에서는 '기술 기반 삶의 질 향상 종합 대책'이 의결되었는데, '고분자 인공근육과 동력 의수족 개발을 통한 장애인·노인 자립 지원'이 중점 추진요소기술에 포함되었다. 과학기술이 국민복지와 안전에 기여해야 한다는 인



2005년 인간과 EAP의 팔씨름 대회 (출처-NASA JPL)

식과 함께, 장애인들의 퇴화된 신체기능을 회복하고 독립 활동권이 확보되도록 도와주는 첨단 재활·보조공학의 중요성이 강조되고 있다. 여기에는 EAP 소재기술과 함께 생체모방 기술의 융합은 생체근육을 대체할 수 있는 인공근육을 개발하는 핵심기술이다. 미래 인공근육 시대의 장애인들은 EAP로 제작된 생체모방형 인공 구동체와 자신의 생체신호에 의해 제어되는 '뇌-기계 인터페이스 기술'이 융합된 신개념의 능동형 재활·보조기술의 발전에 힘입어 손쉽게 홀로서기가 가능할 것이다.

그렇다면 과학기술자들은 언제쯤이면 생체근육을 능가하는 인공근육을 제작할 수 있을 것인가. 2005년의 생체근육-인공근육 팔씨름 결과로 점쳐볼 수 있을까. NASA의 요셉 바-코언 박사가 1999년에 대회를 제안한지 6년이 지나서야 성사된 대회에서 크게는 대형 냉장고 크기의 전원공급장치를 달고 나온 인공근육 팔들은 여고생의 팔에 각각 3초, 4초, 24초 만에 무너지고 말았다. 아직까지 인간의 기술력은 생체근육을 대체하기는 무리라는 것이 증명되었지만, 인간의 팔을 이기는데 최소 20년 이상 걸릴 것이라고 예상해 왔던 관련 과학자들은 인공근육 기술이 상당한 수준까지 도달했다는 긍정적인 평가를 했다. 인공근육의 평가를 단순히 생체근육과의 힘겨루기에서 패배한 문제만을 놓고 실망하거나 단념할 필요는 없다. 생체근육과 인공근육의 경쟁은 아직 끝난 것이 아니기 때문이다. 생체근육, 그 이상의 꿈을 이루기 위한 과학기술인들의 도전은 계속되고 있으며, 이는 미래 인공근육 시대의 막대한 부가가치를 위한 핵심 기반이 될 것이다. ㉓



글쓴이는 서울대학교 공업화학과 졸업 후 동대학원에서 석사학위를, 미국 미시간대학교에서 박사학위를 받았다.