

인공근육기술과 전기활성고분자 (Artificial Muscle Technology and Electroactive Polymer)

연료 및 전자기 구동 장치와 초정밀 동작이 가능한 압전 액추에이터 등은 첨단 기술의 주축으로서 인간 생활 및 과학, 공학의 전 분야에 광범위하게 이용되고 있으나, 생물의 근육과 유사한 유연한 액추에이터의 개발은 아직 초보적인 단계에 머물러 있는 상태이다. 그럼에도 불구하고 근육과 유사한 기계적 활성이 있는 재료의 개발은 최근의 나노 및 바이오 기술의 두드러진 발전과 더불어 지속적으로 요구되고 있다. 이와 같은 근육형 액추에이터는 현대 의학에서 요구되는 신체 이식 재료나 보조기구, 수술이나 분석용 기구 등에서 혁명적 발전을 가져다 줄 것으로 기대된다. 이는 또한 미래의 인간 생활이나 우주 개발에 등장할 로봇이 요철이 심한 지면 위에서도 원활한 구동을 하기 위해 필수적이며 MEMS나 마이크로유체소자 등 극미세 소자 기술의 핵심 부품이 될 것으로 예측된다.

근육은 전동 장치(transmission)나 구동축(drive shaft) 등이 필요하지 않은 선형 전기활성 액추에이터(linear electroactive actuator)이다. 이것이 기존 연료 및 전자기 구동 장치와 근본적으로 다른 점은 수 나노미터 이하의 분자 수준의 움직임이 거시적인 크기의 신체운동으로 전환되는 작동원리에 있다(그림 1). 이 때문에 인공 근육 기술(artificial muscle technology)의 개발을 위해서는 생체모방공학적 접근이 효과적일 것으로 보는 견해가 많다.

전기활성 고분자(electroactive polymer: EAP)는 전기적 자극에 의해 팽창, 수축, 또는 힘 변형 현상을 재현성 있게 보일 수 있는 고분자 재료로서 근육형 구동 메커니즘을 구현하기 위하여 필수적인 유연성과 탄성을 모두 가지고 있다. 약 십여 년 전 고분자 재료가 전기적으로 활성화되면 상당한 변형을 유발할 수 있음이 소개된 이후 과학자들은 다양한 종류의 고분자에 대해 그 전기적 활성을 시험하고 근육과 유사한 구동 장치로의 응용을

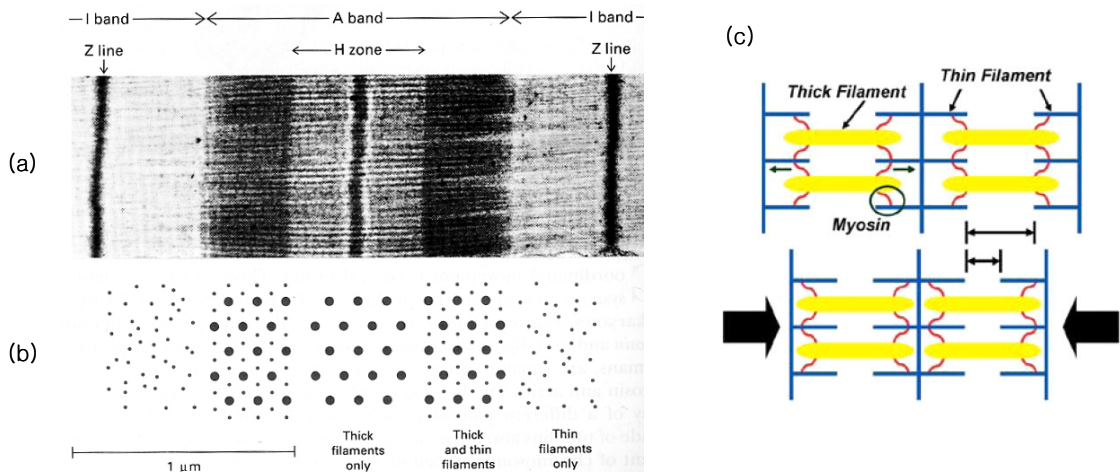
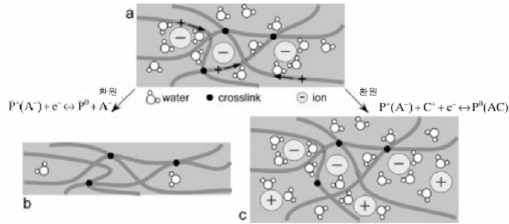
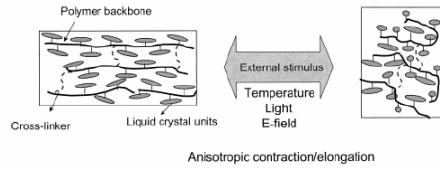


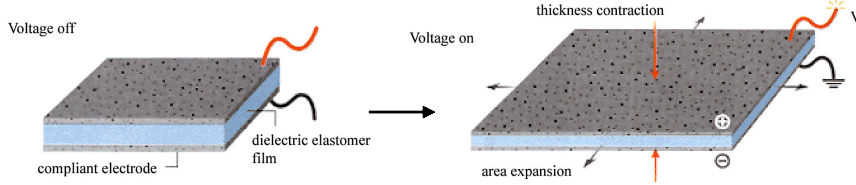
그림 1. 척추동물의 근육세포 미세 구조와 수축 메커니즘. (a) 미세섬유의 전자현미경 사진, (b) 이 섬유의 개략적인 단면 구조, (c) 섬유 내의 굵은 필라멘트와 가는 필라멘트의 배열과 수축 시의 개략적 구조. 근육세포 내부는 그림에 보인 바와 같이 약 1 마이크로미터 굵기의 미세 섬유(a)의 다발이 모여 구성되어 있으며 각 섬유는 굵기가 9 nm와 15 nm인 두 종류의 필라멘트가 (b)와 (c)에서처럼 교대로 연결되어 있는 구조를 가진다. 이 두 필라멘트는 미오신(myosin)과 액틴(actin)이 주성분으로 이 두 단백질은 ATP로부터 에너지를 얻어 반복적으로 결합과 분해하면서 굵은 필라멘트와 가는 필라멘트의 미끄럼 운동을 유도하고 전체적으로 섬유의 수축과 팽창을 일으키게 한다.



(a) 전도성 고분자는 산화 환원시 주로 이온의 이동에 따른 부피변화로 수축과 팽창이 일어난다.



(b) 액정성 탄성중합체의 전기적 변형은 액정의 상전이, 또는 배향의 변화로 변형을 유발한다.



(c) 유전성 탄성중합체의 경우 강한 전기장에 의하여 Capacitor에서처럼 전하 분리가 일어나고 그 인력으로 인해 탄성체를 압착하면서 변형이 일어난다.

그림 2. (a) 전도성 고분자, (b) 액정성 탄성중합체, (c) 유전성 탄성중합체의 전기적 변형.

모색해 왔다. EAP와 유사한 특성을 가지는 재료로서 전기활성 세라믹(electroactive ceramic)과 형상기억합금을 들 수 있지만, EAP 재료가 낮은 응력 레벨에서도 큰 변형을 보이고 생체 근육과 비슷하게 질감, 강인성, 진동 감쇠 특성 등을 가지므로, 단단하고 부서지기 쉬운 세라믹이나 전기적 자극에 대해 매우 느리게 반응하는 형상기억합금 등에 비해 근육형 액추에이터의 재료로서 월등하다고 평가되고 있다. 이 때문에 EAP가 인공 근육(artificial muscle)으로서 불리기도 한다. 대표적인 EAP 물질로는 전도성 고분자(conducting polymer), 탄소 나노튜브, 유전성 탄성중합체(dielectric elastomer), 액정성 탄성중합체(liquid crystalline elastomer), 이온성 고분자/금속 복합체(ionic polymer-metal composites), 강유전성 고분자(ferroelectric polymer) 등이 있으며 최근에는 EAP의 변형 현상을 이용하여 간단한 의료용 재료 또는 장난감 등으로의 상용화도 추진되고 있다. **그림 2**에는 대표적인 EAP인 전도성 고분자, 액정성 탄성고분자 및 유전성 탄성고분자에서의 전기적 수축, 팽창, 변형의 원리를 개략적으로 보인 것이다.

최근에 들어 전도성 고분자 액추에이터를 포함한 기존 EAP 재료들에 대한 재고 및 전망 등이 이 분야를 주도하는 미국의 몇몇 전문가들에 의해 발표되었는데, 지금까지 개발된 대부분 EAP 재료들이 느린 반응 속도, 구동의 재현성, 높은 작동전압 또는 낮은 기계적 에너지 밀도 등과 같은 몇몇 중대한 결점을 가짐으로서 그 실제 응용이 매우 제한적일 수밖에 없음을 설명하고 있다. 여러 가지 EAP 재료 중 전도성 고분자 액추에이터는 인공 근육으로 사용하기에 가장 적합한 특성을 가진다고 평가되고 있으며 특히 의료용 재료로서의 응용이 상당히 유망하다고 예측되고 있다. 예를 들어 30%까지의 큰 변형률(strain), 생체근육의 약 1000배인 고강도, 1 V 이하의 낮은 구동전압, 전력의 추가적인 소비 없이 변형상태를 유지하는 성질, 재질이 가볍고 상온 및 체온에서 작동하는 특성 등을 인공 근육의 소재로 적합한 이유로 들고 있다. 그러나 전압에 대한 느린 반응 속도와 고분자의 가공성, 전극과의 박리현상 등의 문제점 등을 개선하기 위해서는 화학적 구조 및 나노미터 수준의 모폴로지 등이 제어된 새로운 고분자 재료의 연구가 시급하다고 사료되고 있다.

<광주과학기술원 신소재공학과 소프트나노재료연구실 박지웅, e-mail: jiwoong@gist.ac.kr>