

인공근육 소재 및 활용

박상준*, 김선일*, 차은종**, 김선정*

*한양대학교 공과대학 전기제어생체공학부, **충북대학교 의과대학 의공학교실

1. 서론

생체근육은 근섬유로 구성되어 있고, 근섬유는 미오신과 액틴이라는 단백질을 함유하고 있는 두 종류의 필라멘트로 구성되어 있으며, ATP의 생체에너지를 이용하여 두 종류의 필라멘트의 마찰에 의해 능동적으로 수축이완의 기능을 한다. 인공근육은 생체근육과 유사한 수축이완 변형을 일으킬 수 있으며, 환경적인 자극요소에 의해 변형, 응력, 변형속도 등이 제어될 수 있는 특성을 갖는다. 인공근육의 가능성이 있는 재료로 전기활성 세라믹이 있으나 높은 전압이 요구되고 변형율이 적어 인공근육으로의 응용은 기대하기 어려우며, 온도 등에 의해 변형을 일으키는 형상기억합금도 있다. 또한 인공근육으로 가능성이 큰 재료로서 화학기계 시스템(chemomechanical system)으로 분류되는 고분자 재료가 있다. 이 시스템의 물질은 pH, 빛, 전기장, 자기장 등의 외부의 자극으로 인하여 화학자유에너지가 직접적으로 기계적 에너지로 변환되어 물질 자체가 수축이완의 작동거동을 보인다. 이러한 인공근육 고분자 재료는 모터, 기어, 베어링 등의 기계적 구성요소가 없이도 구동되고 초소형, 무소음, 저전력, 저비용 등의 특징을 가지고 있어서 그 응용분야는 매우 넓다.

이러한 인공근육 소재의 연구는 전 세계적으로 항공, 우주, 군사, 의료 등의 첨단 연구 분야에서 활발히 이루어지고 있다. 우주탐사, 화산지대, 또는 지진 등으로 인한 건물의 붕괴 등의 인간이 접근하기 힘든 장소에서 정보와 생존자의 여부 등을 알아야 하며, 테러 또는 전쟁에서 정보 수집은 필수이다. 이런 일들을 해결하기 위해 선진국에서는 생물체를 모방한 초소형 로봇의 개발에 박차를 가하고 있고 이러한 로봇 분야에서 인공근육 소재가 요구된다. 또한 현재의 사회는 노령화로 급속히 변화하고 있어서 노화에 따른 근육의 퇴화로 생기는 질병이 증가하고 있으며, 안전사고 등으로 근육의 손상을 입은 장애도 많이 발생하고 있다. 의료분야에서 인공근육 소재를 이용하여 퇴화 및 손상된 근육을 대체 또는 보완할 수 있다면 인간의 삶의 질을 한층 더 향상시킬 것이다.

2. 인공근육 소재의 분류

2.1. 전기활성 인공근육 재료

전기자극으로 인하여 수축 또는 이완의 변형을 일으키는 재료에는 전기활성 세라믹(Electroactive Ceramic)과 전기활성 고분자(Electroactive Polymer; EAP)가 있다. 전기활성 세라믹은 작동전압이 높고 변형율이 작아 인공근육으로의 응용이 어려우나 전기활성 고분자는 전기자극에 따른 변형율이 높아 인공근육으로의 응용이 매우 기대된다. 이러한 전기활성 고분자는 작동 메커니즘에 따라 크게 두 가지 분류로 나눌 수 있으며 다음과 같다.

- 전장 전기활성 재료 (electronic EAP): 전장 전기활성 고분자는 전기장 또는 쿨롱힘에 의해 구동되며, 그 종류로는 전왜(electrostrictive) 현상으로 인한 강유전성(ferroelectric) EAP, 유전체 EAP, 전왜중이, 전기점탄성체(electroviscoelastic elastomer) 등이 있다.
- 이온 전기활성 재료 (ionic EAP): 이온 전기활성 고분자는 이온의 이동성과 확산으로 구동되며, 그 종류로는 이온 고분자 젤, IPMC(Ionomeric Polymer Metal Composite), 전도성고분자, 탄소나노튜브, 전기유동유체(electrorheological fluids) 등이 있다.

2.2. 비전기활성 인공근육 재료

수축 또는 이완의 변형을 일으키는 재료 중에는 전기자극 외에 빛, 자기장, 열 등의 물리적 자극인자로 인하여 변형을 일으키는 재료와 이온, pH, 생리화학에너지 등의 화학적 자극인자로 인하여 변형을 일으키는 재료가 있다.

- 물리적 자극인자에 따른 재료: 온도 변화에 따라 변형을 일으키는 재료에는 형상기억합금과 상전이 온도를 기점으로 변형되는 형상기억고분자, 고분자 젤 등이 있으며, 빛에 의해서 고분자의 작용기 간에 인력을 변화하여 변형되는 재료와 자기장에 의해 분자를 여기시켜 변형되는 재료가 있다.

- 화학적 자극인자에 따른 재료: 이온과 pH에 따라 고분자의 작용기가 해리되어 작용기 간의 결합 및 인력에 의해 수용액 상에서 변형을 일으키는 재료가 있다. 그리고 미오신, 액틴과 같은 생체 단백질을 이용한 합성 고분자 젤이 있으며, 이것은 화학에너지(ATP)에 의해서 구동된다.

3. 연구개발 동향

3.1. 국외 연구 동향

미국의 NASA는 전액 탄성체를 사용하여 여러 방향으로 굽힘이 가능한 원통형 작동기를 개발하였으며, 이것을 이용하여 곤충형태의 로봇을 제작하여 구동시켰다. 또한 아크릴 필름형태의 작동기를 개발하여 인간형 얼굴 로봇을 제작하여 여러 가지의 얼굴표정을 구현하였다. 미국의 SRI는 유전체 재료인 실리콘 필름과 아크릴 탄성체 작동기를 개발하였으며, 이것을 이용하여 여섯 개의 다리를 가진 소형 육족 로봇을 제작하였고 인간 손모양의 로봇을 구현하였다. 미국의 펜슬베니아 대학에서는 강유전성 재료인 P(VDF-TrFE)의 좌우굽힘 작동기와 탄성분진 복합체를 이용한 작동기를 개발하였다.

미국의 뉴멕시코 대학에서는 고체 고분자 전해질 필름의 양면에 금속전극이 코팅된 다양한 IPMC 작동기를 개발하여, 물위를 헤엄치는 올챙이 꼬리모양의 작동기가 달린 소형 디바이스를 구현하였다. 또한 IPMC를 이용하여 인간의 골격근, 심장의 보조근육으로의 응용 가능성을 제시하였다. 미국 NASA의 JPL에서는 IPMC 작동기를 우주 탐사로봇에 응용하고 있으며, MIT 대학에서는 분자수준에서 전도성 올리고머의 수축이완 메커니즘에 관한 연구를 진행하고 있다. 일본의 호카이도 대학에서는 불가사리 형태의 로봇을 개발하였으며, 일본의 ONRI에서는 여러 개의 IPMC를 조합하여 손가락형태의 디바이스를 구현하였다.

미국의 워싱턴 대학은 탄성튜브를 이용하여 공기압으로 수축이완 변형을 나타내는 McKibben 인공근육을 개발하였으며, 사람의 팔을 모사한 인공 팔을 제작하여 구현하였다. 일본의 도쿠시마 대학에서는 PNIPAM 고분자 젤을 이용하여 빛에 의해 수축이완 변형을 보이는 빛 감응성 작동기를 개발하였다. 독일의 CAESAR는 형상기억합금과 고분자를 복합하여 온도에 의해 스위치의 역할을 할 수 있는 쌍안정의 작동기를 개발하였으며, 이것을 마이크로 그립퍼(gripper)로의 응용 연구를 진행하고 있다.

미국의 일리노이즈 대학은 pH와 이온의 농도에 따라 변형을 일으키는 이온 고분자 젤을 개발하였으며, 작동기 및 센서로의 응용 연구를 진행하고 있다. 미국의 아리조나 대

학에서는 밀리미터 크기의 소형 하이드로젤 작동기를 개발하였으며, 소형 디바이스의 밸브와 레이저 빔의 거울로의 응용 연구를 수행하고 있다. 최근에는 미오신, 액틴과 같은 생체 단백질을 합성고분자에 도입하여 생리화학에너지(ATP)로 구동되는 인공근육의 개발이 일본의 호카이도 대학에서 시도되고 있다.

3.2. 국내 연구 동향

인하대는 전액현상에 의해 작동되며, 종이의 양면에 금속전극을 코팅하여 제조된 전기활성 종이(electro-active paper, EAPap) 작동기를 개발하였다. 이 작동기를 이용하여 마이크로파로 구동되는 원격구동 장치를 통합한 초소형의 비행체를 연구하고 있다. 성균관대는 유전 탄성체 작동기를 이용하여 자벌레 모양의 프로토타입 구동기를 개발하였고, 내시경, 전자점자기 등으로의 응용 연구를 수행하고 있다.

건국대는 IPMC를 이용하여 지능형 초소형 비행 로봇을 개발하고 있고, 단국대는 IPMC와 폴리피롤을 이용하여 공기 중에서 구동되는 작동기를 개발하였고, 벌레와 같이 걸어가는 로봇을 구현하였으며, 올챙이와 유사한 소형 로봇을 개발하였다.

한양대는 생체인공근육으로 응용하고자 생체적합성 재료인 키토산, 하이론산 등과 도전성 고분자인 폴리아닐린, 폴리피롤 등으로 구성된 이온 고분자 젤을 개발하였을 뿐만 아니라 나노 크기의 섬유 젤도 개발하여 나노 섬유를 이용한 미세 작동기를 개발하고 있다. 또한, pH, 이온의 농도에 따라 변형을 일으키는 이온 고분자 젤과 나노 섬유 젤을 개발하였다. 이 젤은 산성에서 작용기가 해리되어 서로 반발력을 일으켜 이완 변형을 일으키며, 염기성에서는 수축 변형을 보인다. 나노 섬유 젤을 일정하게 배열시키거나 꼬아서 번들 형태의 작동기를 개발하고 있으며, 이것은 이온 고분자 젤의 단점인 약한 기계적 응력을 극복할 것으로 기대된다. 인공근육의 생체근육으로 응용에 중점을 두어 연구하고 있으며, 랩온어칩, 마이크로펌프 등의 MEMS 의료분야에서의 미세작동기, 초소형 로봇, 수술용 로봇 등의 미세작동기 및 센서 등으로의 응용연구도 수행하고 있다.

4. 산업화 동향

인공근육으로 응용될 수 있는 작동기는 현재 국외 여러 기업을 통해 개발되고 있고 인공근육으로 응용될 수 있는 재료들에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다. 이들 회사

들이 개발한 재료들은 우수한 전기적 특성을 갖고 있어 소형 로봇의 동력원으로부터 의료용 기기에 이르기까지 다양한 기능을 가진 제품들에 응용되고 있다. 인공근육 기술로는 전기활성 재료와 비전기활성 재료에 의한 인공근육 개발이 있다. 물리적 또는 화학적 자극요소에 의한 비전기활성 재료는 대학 및 연구기관에서 연구되고 있으나 기업체에서는 아직 상품화를 위한 제품 개발 단계에는 이르지 않고 있다. 현재 인공근육으로 이용될 수 있는 제품 개발은 주로 전기활성 재료인 전장 전기활성 재료 또는 이온 전기활성 재료를 이용하고 있으며 몇몇 회사를 중심으로 제품 개발뿐만 아니라 생산이 이루어지고 있어 조만간 다수의 회사들이 인공근육을 상품화 시킬 것으로 예상된다.

미국의 MCNC Research and Development Institute는 인공근육에 MEMS 기술을 접목시켜 소형 작동기를 개발하였고 유연성을 갖춘 고분자 필름을 이용해 인공 눈꺼풀 개발에 성공했다. 미국의 SRI International은 탄성체와 유전체 EAP를 이용한 작동기를 개발하였으며 현재 소형 로봇을 만들기 위한 인공 근육을 개발 중에 있다. 스웨덴의 Micromuscle AB는 전도성 고분자를 이용한 마이크로 크기의 작동기를 개발하였고 이들 개발품은 의료용 기기 및 혈관 수술을 위한 소자로도 이용될 수 있다. 미국의 Molecular Mechanism LLC는 전도성 고분자 테이프를 이용해 공기 중에서도 작동될 수 있는 이중 구조체 작동기를 개발했다. 이들 회사는 아직 제품의 상업화를 위한 단계에는 이르지 못했으나 곧 상업화된 제품이 나올 것으로 기대된다. 미국의 Artificial Muscle, Inc.는 인공근육의 전기적 특성을 기반으로 한 밸브 컨트롤러, 펌프, 음향조절 스피커 등을 개발하고 있으며, 현재 선형 구동 실린더형 작동기, 다이어프램 작동기, 필름형 센서 등을 개발하여 상품화 시켰다. 미국의 Environmental Robots Incorporated는 각종 작동기 및 센서를 개발하여 상업화된 제품으로 판매를 하고 있다. 특히, 이 회사는 다양한 구동 전압 신호에 반응하고 변형 시 마이크로 전압을 발생시킬 수 있는 마이크로 근육 키트를 개발하여 판매하고 있다. 한편, 일본의 EAMEX Corporation은 IPMC를 이용해 인간의 손을 모사한 인공 근육을 개발했으며 현재는 EAP를 응용한 인공 물고기 제품을 상업화 시켰다. EAMEX는 인공근육 제품의 의학적 응용을 위해 의료용 카테터에 튜브형 소자를 삽입할 수 있는 제품을 개발 판매하고 있다. 고분자를 재료로 한 전기활성 재료 이외에도 금속재료의 장점을 접목시킨 제품이 개발되고 있는데 최근 미국의 Nanosonic, Inc.은 탄성체 전기활성 재료와 금속을 합성한 고무형 금속 박판과 센서를 개발함으로써 전기전도성이 매우 높고

반응이 매우 빠른 제품을 상업화하였다.

국내의 몇몇 대학 및 연구소에서 전기활성 재료와 비전기활성 재료를 이용한 인공근육 연구가 진행되고 있으나 인공근육 연구를 시작한지 불과 몇 년 되지 않아 상업화 제품은 아직까지 생산되지 못했다. 국내의 인공근육 연구진들은 생체근육으로의 응용뿐만 아니라 마이크로 로봇, 바이오 로봇, 생체모방시스템 등으로의 응용 연구를 활발히 진행하고 있어서 몇 년 안에 인공근육의 상품화가 기대된다.

5. 활용분야

5.1. 바이오센서 및 미세작동기 분야

미래의 의료형태는 병원에 직접가지 않고 집 또는 일상 생활에서 몸의 상태를 진단, 모니터링을 하는 원격재택의료시스템의 형태가 될 것이다. 이러한 시스템에서는 소형이고 휴대형의 진단기기가 필요하며, 대표적인 것이 랩온어칩(Lab-on-a-chip)이다. 이 칩은 바이오센서, 마이크로 채널, 마이크로 밸브, 마이크로 펌프 등으로 구성되어 있다. 인공근육은 초소형화가 가능하고 미세신호를 계측할 수 있으므로 바이오센서로 응용가능하며, 마이크로 채널 내에서 유체를 제어하는 마이크로 펌프 또는 미세 작동기로 응용할 수 있다.

5.2. 바이오 로봇 및 생체모방시스템 분야

과학기술의 발전으로 인류의 삶이 윤택해지고 산업용 로봇이 아닌 인간친화형, 인간생활지원 로봇이 요구되고 있다. 이러한 바이오 로봇은 인간에 안전해야하며, 소음 등이 없는 특징을 가져야한다. 인공근육은 기계적 구성요소(moter, gear 등)가 없어서 소형이 가능하며, 소음이 없는 특징을 가지고 있으므로 마이크로 로봇, 바이오 로봇, 수술용 로봇, 소형 비행체, 생체모방시스템 등에서 미세구동기로 응용할 수 있다.

5.3. 의료분야

급속한 노령화와 사회적 가치관의 변화로 인하여, 현 인류는 삶의 질의 향상과 건강한 삶에 대해 매우 큰 관심을 보이며, 건강한 생명사회를 지향하고 있다. 또한 과학기술의 발전으로 인하여 복잡한 사회를 구성하고 있어 안전사고로 인한 인체의 기능장애 또한 많이 발생되고 있다. 이러한 이유로 의료산업의 수요가 증대되고 있으며, 노령화로 인하여 인체의 노화에 따른 질병을 갖는 사람과 사고로 인한 장애를 갖는 사람이 급증하고 있다. 인체의 노화

로 인한 여러 질병 중 가장 대표적인 것이 노안이며, 이 노안은 40세 이상이 되면 서서히 눈의 조절력이 떨어지기 시작해서 책을 오래 보기가 힘들어지고 눈앞이 침침해지며, 60세 이상이 되면 조절력을 거의 상실하여 가까운 것을 명확히 볼 수 가 없게 되는, 누구에게나 나타나는 생리 현상이다. 눈의 조절이란 가까운 물체를 주시하기 위해 눈에서 일어나는 현상으로 눈의 모양체근의 수축에 의해 모양소대의 이완이 일어나 수정체의 만곡이 증가되어 일어난다. 노안은 이러한 조절의 약화에 의해 가까이 있는 물체에 대한 초점을 제대로 맞추지 못하기 때문에 일어나는 것이다. 인공근육은 모양체근과 같은 평활근(smooth muscle)을 보완, 대체할 수 있으므로 노화에 따른 질병 치료에 응용할 수 있다. 또한 사고 또는 질병으로 인하여 손상되거나 퇴화된 근육 즉, 안면근(face muscle), 골격근(skeletal muscle), 심장근(cardiac muscle) 등으로 응용할 수 있다.

5. 결 론

최근 10년간 인공근육 소재의 연구가 활발히 진행되어 왔으며 외국의 몇몇 기업들은 인공근육을 상품화하여 시판하고 있다. 하지만 지금까지 개발된 인공근육 소재는 로봇 및 생체근육으로 응용하기에는 아직까지 많은 문제점을 가지고 있다. 그 예로써 전장 전기활성 재료는 높은 작동전압으로 인해 전압 breakdown차폐, Packaging, 소형화 등 디바이스 구현이 어렵다. 그리고 이온 전기활성 재료인 IPMC는 전기장을 가했을 때 폴리머 망에 양이온의 이동에 의해 굽힘현상을 일으키지만 수축이완의 변위는 발생하지 못하는 단점을 가지고 있다. 이러한 인공근육 소재의 제한된 성능 때문에 새로운 인공근육 소재의 개발이 필요하고 인공근육 소재의 연구에 있어서 극복해야 할 점들은 힘의 증가, 신속한 응답, 저전력 구동에너지 등의 성능을 향상시키는 것이다. 또한 생체근육으로 응용하기 위해서는 생체적합성 뿐만 아니라 생체조직과의 연계도 매우 중요한 문제이다.

감사의 글

본 연구는 보건복지부 보건의료기술진흥사업의 지원에 의하여 이루어진 것임.

참고문헌

- [1] Bar-Cohen Y, Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles, Bellingham, WA: SPIE Press, 2004.
- [2] Bar-Cohen Y, Breazeal C, Biologically inspired intelligent robots, Bellingham, WA: SPIE Press, 2003.
- [3] Bar-Cohen Y, Electroactive polymer Actuators and Devices (EAPAD) in Smart Structures and Materials 2005, Proceedings of SPIE Vol. 5759 (SPIE, Bellingham, WA, 2005).
- [4] Bar-Cohen Y, Worldwide electroactive polymers (artificial muscles) newsletter, <http://www.ndeaa.jpl.nasa.gov/nasa-nde/lommas/eap/EAP-web.htm>.
- [5] Yoshida R, Design of functional polymer gels and their application to biomimetic materials, Current Organic Chemistry, 2005, vol. 9, pp. 1617-1641.
- [6] Madden J.D.W., Vandesteeg A., Anquetil P.A., Madden P.G.A., Takshi A., Pytel R.Z., Lafontaine S.R., Wieringa P.A., Hunter I.W., Artificial muscle technology: Physical principles and naval prospects, IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, vol. 29, pp. 706-728.

저자약력



《박 상 준》

- 1999년 강원대학교 화학공학과 졸업.
- 2001년 강원대학교 대학원 화학공학과 (공학석사)
- 2006년 한양대학교 대학원 의용생체공학과 (공학박사)

- 2006년 ~ 현재 한양대학교 생체인공근육창의연구단, 포닥 연구원.
- 관심분야 : 인공근육, 하이드로젤, 바이오 액츄에이터, 나노-바이오 센서.



《김 선 일》

- 1987년 Drexel Univ. (공학박사)
- 2005년 ~ 현재 한양대학교 전기제어생체공학부 교수.
- 관심분야 : 인공근육, 가상현실, 생체신호, 의료영상.



《차 은 중》

- 1987년 남가주대학 (공학박사)
- 1988년 ~ 현재 충북대학교 의공학교실 교수.
- 관심분야 : 생체역학, 생체모델.



《김 선 정》

- 1994년 한양대학교 대학원 (공학박사)
 - 2005년 ~ 현재 한양대학교 전기제어생체공학부 부교수.
 - 관심분야 : 인공근육, 나노바이오연료 전지, 나노-바이오 센서, 바이오 액추에이터.
- 연락처 : Phone : +82-2-2220-2321
 Fax : +82-2-2296-5943
 E-mail : sjk@hanyang.ac.kr
 URL : <http://nbt.hanyang.ac.kr>