

생체모방 근육형 작동기 개발 및 응용



윤 광 준 / 건국대학교 기계항공공학부, 교수
e-mail : kgyoon@konkuk.ac.kr

박 훈 철 / 건국대학교 기계항공공학부, 교수

구 남 서 / 건국대학교 기계항공공학부, 교수

배 영 민 / 건국대학교 의과대학 생리학교실, 교수

실생활에서 발견할 수 있는 지능구조의 예는 지구상의 모든 동식물이며 그중 가장 훌륭한 예는 인간이라 할 수 있다. 인체는 스스로 느끼고, 생각하고, 반응한다는 지능구조를 완벽하게 구현하고 있는 것이다. 이 글에서는 지능구조의 필요 성능 중 하나인 작동 성능에 중점을 두고 근육 작동 원리의 공학적 이해, 압전형 작동기의 개발 현황 및 궁극적인 목표인 생체모방 근육형 작동기의 개발 가능성을 소개하고자 한다.

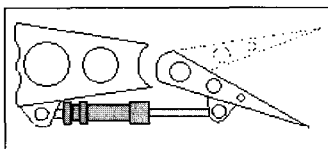
18세기 일어난 산업혁명은 중세 농업국가에서 근대 산업국가로 탈바꿈하는 계기가 되었다. 이러한 역사적 사건이 일어나게 된 초석은 바로 증기 기관의 발명이다. 이후 산업화의 발자취를 살펴보면 새로운 동력 변환 장치가 개발될 때마다 사회경제적인 변화가 발생하고 새로운 패러다임을 가진 세상이 열리게 됨을 알 수 있다. 21세기에 출현하리라고 많은 사람들이 기대하고 있는 것 중 하나가 바로 인간형 또는 생체 모방형 로봇이다. 공상 과학 소설이나 영화에서 다루어졌던 많은 소재들이 기술적인 진보에 따라 점차 현실로 나타나는 것을 볼 때 이러한 기대가 상당히 가능성이 있음을 알 수 있다. 그런데 공상 과학 영화, 예를 들면 터미네이터에 나오는 생체 모방형 로봇의 작동 제어에 사용되는 작동기는 바로 전기식 회전 모터이다. 즉 현재까지 일반 로봇 및 자동차, 선박, 항공 우주 비행체 등 기계 구조물의 작동 제어를 위하여 개발된 대표적인 작동기는 유압 작동기와 회전 모터이다(그림 1(a), 1(b)). 그러나 이들 작동기는 중량이 무겁고 작동기 구조물이 복잡한 단점으로 인하여 인간형 로봇의 작동기나 소형 지능형 운행

체의 작동기로는 적합하지 않다. 따라서 그림 1(c)와 같은 근육형 작동기를 개발할 수 있다면 기존과는 다른 새로운 방식으로 구동되는 로봇이 출현하게 될 것이다.

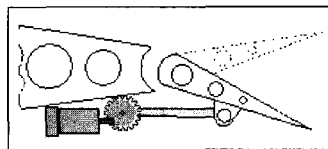
공학도인 우리에게 주어진 과제는 어떻게 근육형 작동기를 개발할 수 있는냐 하는 것이다. 이 글에서는 먼저 생체 근육의 작동원리를 간단히 소개하고 압전형 지능작동기의 발전 역사 및 생체 모방형 작동기의 개발 가능성에 대하여 전망해 보도록 한다.

근육 작동 원리의 공학적 이해

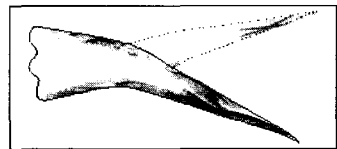
인간과 동물의 활동을 일으키는 근육은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 하나는 소화기관이나 혈관, 비뇨기 계통을 구성하여 생명현상을 조절하는 내장근(visceral muscle)으로, 형태학적으로 그 평면에 횡문이 없고 매끈하게 보이므로 평활근(smooth muscle)이라고도 한다. 다른 하나는 우리 몸의 골격에 붙어 있으며, 뇌의 명령에 따라서 몸의 움직임을 일으키는 골격근(skeletal muscle)



(a) 유압식 작동기



(b) 회전 모터식 작동기



(c) 근육형 작동기

그림 1 각종 작동기에 의한 항공기 날개의 조종면 작동 방식

이다. 골격근은 수축 단백질의 질서있는 배열에 의한 횡문(striation)이 관찰되므로 횡문근(striated muscle)이라고도 한다. 평활근은 우리의 의지대로 조절할 수 없는 불수의근이고, 골격근은 수의근이다. 이 두 가지 외에 다른 한 종류의 근육이 있는데 심근이 그것이다. 심근은 형태적으로는 횡문이 관찰되는 횡문근이지만 수의적으로 조절할 수 없는 불수의근이다. 지속적인 고혈압 등을 앓고 있는 사람은 혈관벽에 많은 압력이 걸리기 때문에 혈관평활근층이 비대해지는 경우가 많으며, 바벨, 아령 등으로 웨이트 트레이닝을 하면 골격근이 단련되어 보다 빌더와 같은 근육질의 몸매를 가질 수 있게 된다. 평활근과 골격근은 모두 액틴(actin)과 마이오신(myosin)이라는 수축 단백질의 결합에 의하여 근육의 길이가 짧아져서 수축이 일어나는데, 그 세부적인 기전에는 차이점이 있다. 공학을 전공하는 이 글의 독자들에게 먼저 관심이 가는 것은 주로 운동을 지배하는 골격근이라 할 수 있을 것이다.

실제 근육은 신경으로부터의 작은 전기적인 신호를 손실 없이 먼 거리를 전달 받아 효과적인 수

축을 일으킨다. 이러한 전달기전은 신경이 전기 케이블과 같은 역할을 수행하여 전기신호를 전도(conduction) 시키는 외에 활동전압 발생을 통한 전도를 함으로써 신호를 손실 없이 전달하게 되며, 마지막에 전기적인 신호를 화학적, 그리고 기계적인 신호로 바꾸는 흥분-수축 연결(excitation-contraction coupling) 과정을 통해 신호를 증폭하여 큰 수축력을 낼 수 있게 된다. 또한, 생체는 수축력을 조절하기 위해서 각기 역치가 다른 신경-근 단위(운동단위)를 가지며, 이 운동단위를 동원하는 정도를 변화함으로써 수축력을 조절한다.

흥분-수축 연결의 최종 단계는 근육 세포 내의 수축 단백질들의 결합에 의한 근 길이의 감소이다. 근육에는 가로방향으로 수 없이 많은 액틴과 마이오신이라는 사이토스켈레톤(cytoskeleton)들이 있고, 현미경상에서는 이들의 겹침에 의해서 횡문이 관찰된다. 근수축은 이들의 결합상태에 따라서 근 길이가 조절되는 것을 말한다.

그림 2는 골격근의 구조를, 그림 3에는 현재 인정되고 있는 수축의 개략적인 모델인 액틴의 폴리머화(polymerization) 모델을 보여준다. 성인의

상박에 있는 소위 이두박근(상완이두근, biceps brachii : 보통 말하는 알통을 만드는 근육)의 예를 보면, 이 하나의 골격근은 수천 개의 근섬유(muscle fiber=근세포, muscle cell)로 구성되어 있는데 그 직경은 50 ~ 100 μ m 정도이고 길이는 대략 ~ 20cm 정도에 이른다. 근섬유(근세포)는 직경 1 μ m 정도의 근원섬유(myofibril) 다발로 되어 있고, 각 근섬유는 1,000개 이상의 근원섬유를 포함하고

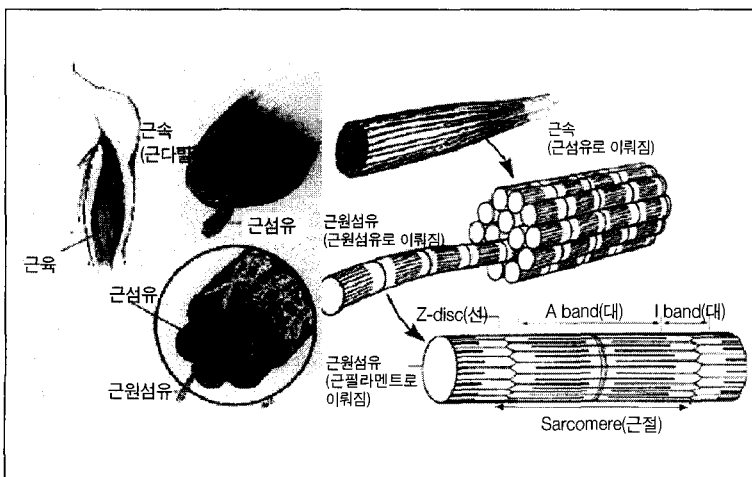


그림 2 근육의 미세 구조

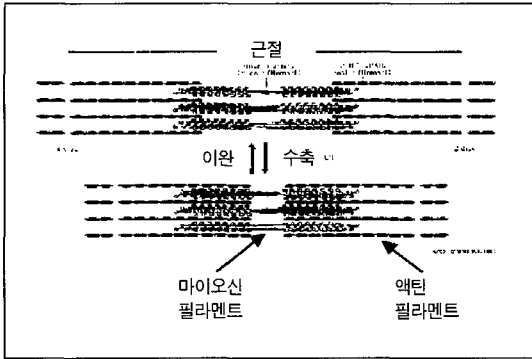


그림 3 흥분-수축 연결 기전 : 액틴 필라멘트와 마이오신 필라멘트의 상대변위가 발생

있다. 개개의 근원섬유는 종축으로 달리는 병렬 배열의 수많은 근필라멘트(myofilament)를 가지고 있고, 여기에는 굵은 것($100\sim 120\text{\AA}$, myosin, 마이오신)과 가는 것($60\sim 70\text{\AA}$, actin, 액틴) 두 종류가 있다. 이와 같이 근육은 가는 필라멘트들이 병렬로 모여서 근원섬유를 이루고, 다시 이들이 병렬로 모여 근섬유가 되는 구조를 보인다(그림 2 좌). 또한 길이 방향으로 살펴보면 횡문의 기본단위인 근절(sarcomere : Z-disc와 Z-disc 사이)이 수 없이 많이 직렬로 연결된 구조임을 알 수 있다(그림 2 우). 근섬유의 길이의 단축은 결국 근절들의 길이가 짧아지는 것이다.

이러한 설명을 그림 3에 도식적으로 나타내었으며, 액틴 필라멘트 사이로 마이오신 필라멘트가 이동하여 들어가서 근육이 수축된다. 액틴 필라멘트와 마이오신 필라멘트 사이의 이동은 둘 사이에 팔과 같은 작동기가 달려 있어 둘 사이의 상대적인 변위를 유발시킴을 관찰할 수 있다. 이 때 생체 에너지원인 ATP가 ADP로 변환하는 대사가 일어난다.

생체 근육의 작동원리는 아직 명확히 규명되지는 않았지만, 앞에서 기술한 바가 현재 정설로 받아들여지는 작동 원리이며 이를 공학적인 관점에

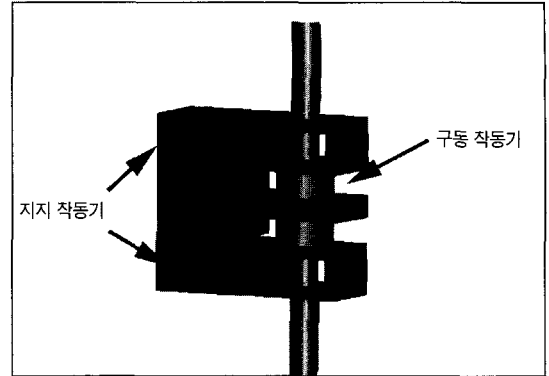


그림 4 사진기 줌에 사용되는 인치웸의 개략도

서 관찰하면 다음과 같은 사실을 추론할 수 있다.

첫째, 미소 단위의 작동기가 모여 대형 작동기를 이룬다. 지금까지 능동 작동기의 개발 추세를 보면 주로 단위 작동기의 성능 향상에 주력하고 있으므로 근육형 작동기를 제작하기 위해서는 미소 작동기를 제작한 후 이를 조합하여 큰 작동 변위와 작동력을 낼 수 있도록 조합하는 연구가 필요하다. 이를 위하여 복잡한 전극 처리, 신호 전달 처리를 할 수 있도록 MEMS 기술의 도입이 선행되어야 할 것이다.

둘째, 단위 세포들의 작동 기전을 보면 인치웸 기어와 같이 기구학적인 작동을 하고 있다는 것이다. 사실 공학적인 발명품들이 자연의 현상을 본 뜬 것이므로 당연한 일이지만 생체 근육의 기본적인 작동은 일반적으로 많이 사용되고 있는 인치웸 기어의 작동 원리와 같다는 것은 놀라운 일이 아닐 수 없다. 그림 4에는 사진기 줌을 조절하는 데 사용되는 인치웸 기어를 나타내고 있다. 작동 압전작동기가 몸체 부분을 이동시키고 고정 압전작동기가 이동된 위치로 몸체를 고정시키는 동작을 반복하면서 몸체를 이동시킨다. 앞에서 설명하였듯이, 액틴 필라멘트와 마이오신 필라멘트 사이에 팔과 같은 작동기가 이 역할을 수행한다.

압전 작동기의 개발 현황

지능 구조물에 적용되는 대표적인 재료를 보면 압전재료(piezoelectric material), 광섬유(optical fiber), 형상기억합금(shape memory alloy), ER 유체 (electro-rheological fluid), MR 유체 (magneto-rheological fluid) 등이 있다. 이 중 압전재료는 감지기의 특성과 작동기로서의 특성을 모두 가지고 있기 때문에 사물을 인지하고 판단하여 실행에 옮기는 지능 구조물의 개념을 가장 잘 구현할 수 있는 것으로 생각되어 많이 연구되고 있다. 압전 세라믹(PZT : piezoceramic)과 압전 필름(PVDF : polyvinylidene fluorides)은 대표적인 압전재료로 사용되어 왔으며 압전 변형 상수 (piezoelectric strain constant)가 큰 압전 세라믹은 작동기로, 압전 전압 상수(piezoelectric voltage constant)가 큰 압전 필름은 감지기로 유리하다고 알려져 있다. 근래에는 전통적으로 사용되던 PVDF 이외에 IPMC(Ionic Polymer Metal Composite), 유전 탄성체(dielectric elastomer)와 같은 압전 폴리머(EAP : Electric Active Polymer)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

여기에서는 작동기 관점에서 우수한 성능을 내는 압전 세라믹 작동기의 개발 현황에 중점을 두어 소개한다.

바이모프 작동기

바이모프(Bimorph) 형태의 압전 작동기는 그림 5와같이 두 개의 압전 세라믹의 폴링 방향을 반대로 배열한 것으로 압전 세라믹의 인장-압축으로부터 굽힘을 유발하는 것이다. 이 압전 작동기는 상당히 큰 작동 변위를 유발하지만 상대적으로 작동력이 작은 단점이 있다.

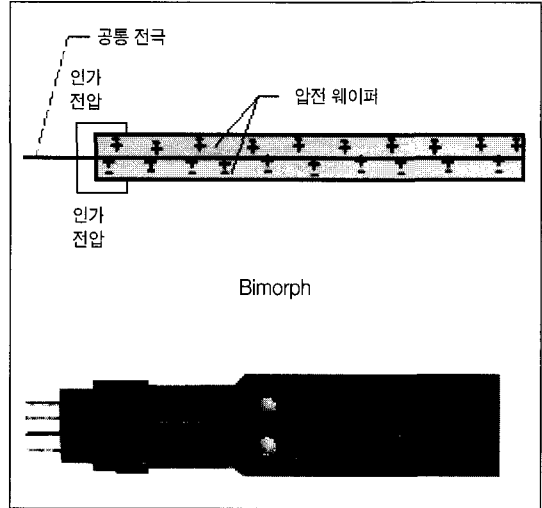


그림 5 바이모프형 작동기(미국 ACX 사 제품)

다적층 세라믹 작동기

그림 6은 다적층 세라믹 작동기(multilayer ceramic actuator)를 나타낸다. 다적층 세라믹 작동기는 여러 개의 PZT를 배열하여 일체로 제작한 것으로 적층수만큼 변위가 배가되므로 큰 작동력이 필요한 부분에 유용하게 사용될 수 있다. 그러나 무게가 무거워지고 소모 전기용량이 커지는 단점이 있다.

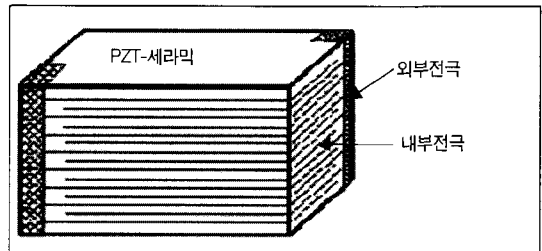


그림 6 다적층 세라믹 작동기

무니 작동기

그림 7의 무니(moomie) 작동기는 압전재료의 작은 작동 변위를 횡 방향 변위로 증폭한다. 이 작

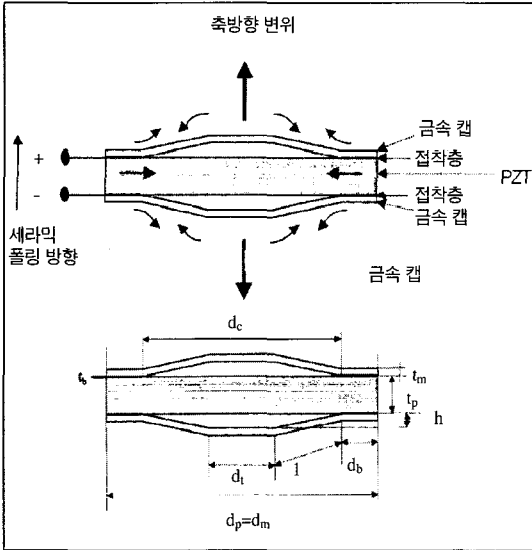


그림 7 Moonie 작동기 형상 및 작동 원리

동기는 'cymbals' 또는 빈 공간의 형상이 달과 같다 하여 'moomie' 작동기라고 불린다. PZT재료에 붙어 있는 금속 다리(endcap)의 재질 및 접착시의 온도 변화에 따른 초기응력(prestress)에 따라 다른 특성을 얻을 수 있는 장점이 있다.

RAINBOW 작동기

RAINBOW(Reduced And INternally Biased

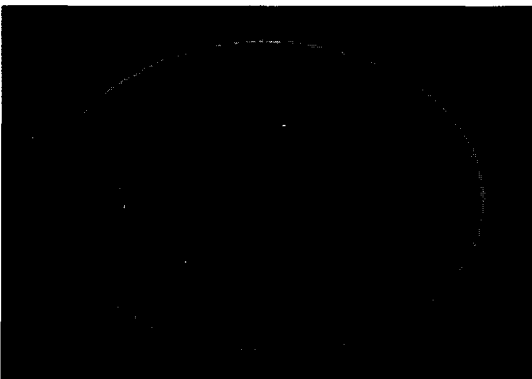


그림 8 Dome 형상의 RAINBOW 작동기

Oxide Wafer)는 화학적인 반응을 통하여 PZT의 한 쪽 면을 환원시킨 것이다. PZT를 그라파이트와 함께 넣고 975°C의 고온으로 가열하면 PZT와 그라파이트의 경계면에서 산소가 날라가 금속성의 비압전 재료층과 압전재료층이 일체의 구조를 갖게 된다. 이를 냉각시키면 두 층 사이의 열팽창 계수의 차이로 인하여 곡률을 가지게 된다(그림 8). 이와 같이 성형된 곡면 압전 작동기의 경우 펌핑 동작(pumping motion)을 통하여 큰 작동 변위를 나타낸다. 그러나 외부 충격에 약한 단점을 가지고 있다.

THUNDER 작동기

미국 항공우주국 랭리 연구소(NASA-Langley Research Center)에서 개발된 박판 유니모프 작동기 THUNDER(THin layer UNimorph DrivER)는 낮은 입력전압에 비해 큰 작동 변위를 발생시킬 수 있는 압전 세라믹 작동기로서, 그림 9와 같이 금속재료와 압전 박판으로 적층되어 있다.

THUNDER는 스테인리스 스틸 위에 고온 경화용 접착제를 바른 후 압전 세라믹을 놓고, 그 위에 알루미늄 포일을 덮어 325°C에서 경화시킨 후 상

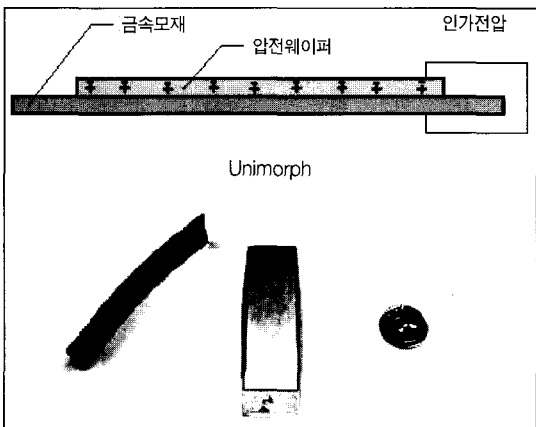


그림 9 THUNDER 작동기 형상

온으로 냉각시키면, 각 구성 요소의 열팽창 계수 차이로 인하여 곡률을 가지게 된다. 이러한 기하학적인 형상 때문에 전기장이 세라믹 층에 걸리게 되면 압전 세라믹 층의 변형은 곡률 변화를 가져오고 중앙 부분에서 작동 변위를 발생시킨다.

THUNDER는 현재까지 개발된 유니모프형 작동기 중 가장 성능 좋은 작동기로 인정받고 있으나, 작동기 전체의 비중이 철과 비슷하여 항공우주용 작동기로 응용되기에는 중량이 무거운 편이다.

LIPCA 작동기

건국대학교 능동 구조/재료 연구실(Active Structure & Material Laboratory)에서는 최근 NASA Langley Research Center에서 개발한 압전 재료 작동기인 THUNDER보다 작동 변위가 우수한 복합재 작동기 LIPCA(Lightweight Piezo-Composite Actuator, 그림 10)를 개발하였다. 금속층을 사용하는 THUNDER와는 달리, LIPCA는 맨 위층을 열팽창 계수가 거의 없는 탄소섬유 복합재료 층으로 하고, 중앙에는 압전 세라믹 층을 두며, 맨 아래층에는 열팽창 계수가 큰 유리섬유 복합재료 층으로 적층하여 오토클레이브에서 가열, 가압하여 제작한다. 즉, 설계 요점은 THUNDER의 무거운 금속 층들을 가볍고 탄성이 우수한 복합재료로 대체하는 것이다. 그러면서도 작동 변위는 더 크고, 하중이 가해진 상황에서의 작동 변위의 감소도 줄일 수 있도록 설계하는 것이 중요한 설계 기법이다.

LIPCA는 복합 재료를 적용했기 때문에 THUNDER 무게의 40%만큼을 줄일 수 있고, 복



그림 10 LIPCA 작동기 형상

합재 층의 섬유 방향 및 복합재 층의 크기를 바꿈으로써 설계를 다양화 할 수 있다는 장점이 있다. 또한 제작에 있어서도 각 층이 에폭시로 접착되기 때문에 특별히 접착층을 따로 둘 필요가 없고, 전극을 복합재 층 사이에 두고 170°C로 autoclave에서 성형하는 단순한 공정이 또 하나의 장점이다.

평면 몰드에서 제작된 LIPCA는 최종 제작 형상이 충분한 곡률을 가지고 있어서 THUNDER와 같은 곡면 작동기로 사용할 수 있음을 확인한 바 있고, 고전 적층판 이론으로 곡률을 계산한 결과, 실제로 측정된 곡률과 잘 일치하였다. 작동 특성을 비교하기 위하여 동일한 경계조건을 갖는 고정틀에서 THUNDER와 LIPCA를 동시에 작동시킨 결과, LIPCA의 작동 변위가 더 크음을 확인하였다. 이

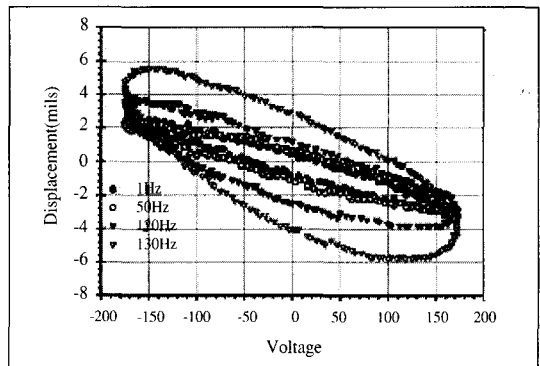
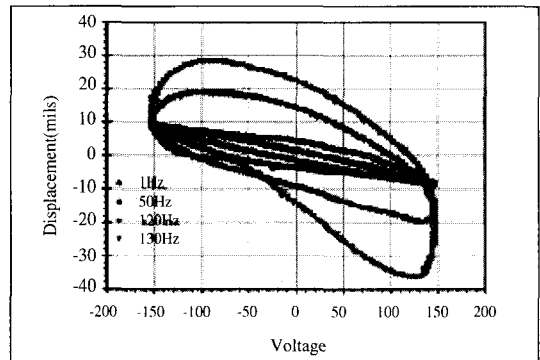


그림 11 LIPCA(위)와 THUNDER(아래)의 작동 특성: LIPCA의 작동 변위가 THUNDER보다 3배 이상 큼.

러한 사실은 THUNDER를 개발한 당시 NASA 연구원 중 한 명(Karla Mossi, 현재 Assistant Professor, Virginia Commonwealth University)이 2003년 3월 San Diego에서 열렸던 SPIE's 10th International Symposium on Smart Structures and Materials에서 밝힌 바 있다.(그림 11)

AFC 작동기

미국 MIT에서 개발된 작동기인 AFC(Active Fiber Composite) 작동기는 기존 압전 작동기가 d_{31} 효과(3방향 전위차를 가하여 1방향으로 변형이 일어나는 것)를 사용하는 것에 비해 d_{33} 효과(3방향 전위차를 가하여 3방향으로 변형이 일어나는 것)를 사용한다. 이를 위하여 그림 12에 나타낸 바와 같이 작동기 표면에 복잡한 형상의 전극(interdigitated electrode, 빗살형 전극)를 사용한다. 빗살형 전극이 전체 작동층의 상하 표면에 부착되어 있어 기하학적 형상에서 완전한 d_{33} 작동 구조가 아니고 전극 너비만큼의 손실도 유발된다는 단점이 있다.

IDEAL 작동기

전국대학교 능동 구조/재료 연구실에서 제안한 것으로 IDEAL(InterDigitated Electrode Actuation

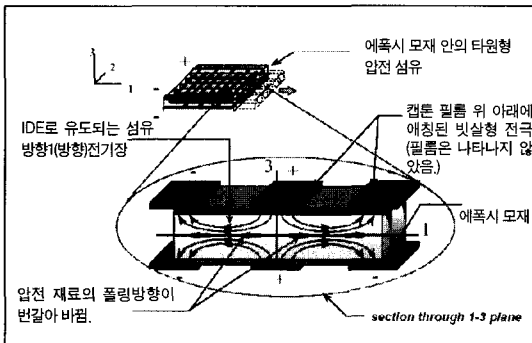


그림 12 AFC 구조

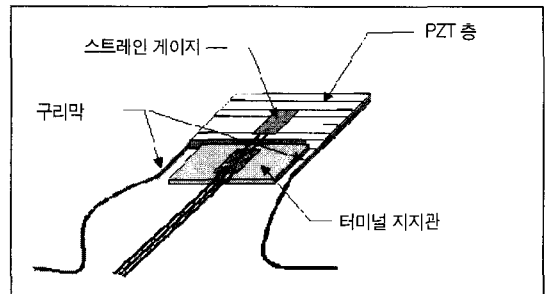


그림 13 IDEAL 작동기

Layer) 작동기라 명명하였다. 압전 세라믹의 d_{33} 작동효과를 극대화하기 위하여 그림 13과 같이 빗살형 작동전극을 적층된 세라믹층 사이로 삽입시켰고 양극과 음극이 교차되어 배치될 수 있도록 삽입 전극과 옆면 주전극선을 연결하였다. 또한 삽입 전극의 끝단과 반대 주전극선과의 통전을 방지하기 위하여 1mm 이상 떨어지도록 하였다.

섬유형 작동기나 IDEAL 작동기 모두 복잡한 전극 제작이 필수적인 요소인데 이는 아직까지 해결되지 못하고 있는 부분으로 압전재료와 전극과의 접착력 증대, 미세한 전극의 배열을 위한 MEMS 공정 개발 등이 핵심 연구 과제이다.

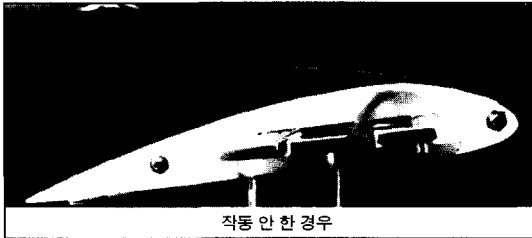
압전 작동기 응용

압전 작동기는 로봇의 구동, 유도무기의 자세제어용 작동기 등 다양하게 응용될 수 있으며, 많은 아이디어가 소개되어 왔다. 그 중에 대표적인 압전 작동기인 THUNDER와 LIPCA의 응용사례를 소개한다.

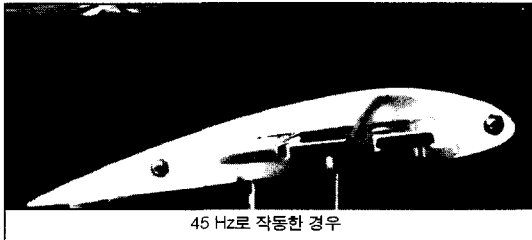
그림 14에 나타낸 Mesoscale Mobile Robot의 경우는 두 개의 THUNDER



그림 14 THUNDER 작동기를 이용하여 개발한 기는 로봇



작동 안 한 경우



45 Hz로 작동한 경우

그림 15 Wing Module을 'f = 45Hz'로 작동시킨 형상

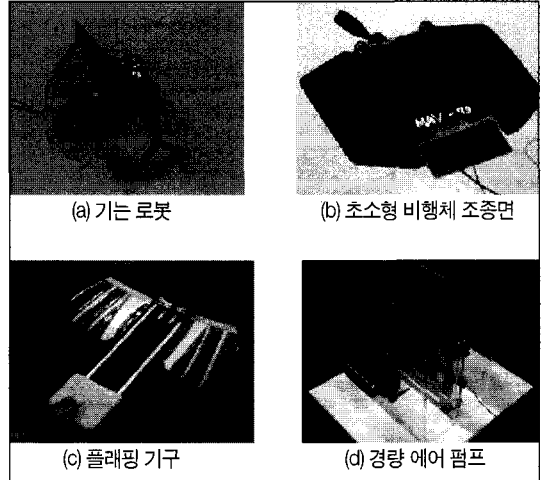
7R작동기의 수직방향 변위를 기구학적으로 이용한 것이다. 무게는 50g이며, 작동전압은 AC 240 V에서 작동하고, 최고속도는 300mm/sec이다. 이때의 작동 주파수는 32Hz이며, 1400mW의 전력이 사용된다.

그림 15는 제작된 날개 모형을 레이놀즈수 = 2.5×10^4 , 받음각 = 9° 인 상태에서 작동기를 45 Hz로 작동시켰을 경우 박리점 변화를 알아보기 위한 풍동 시험으로서 박리점은 익형의 끝단 부분으로 이동되어 양항비(L/D)가 개선되었다.

그림 16는 LIPCA를 응용하여 현재 개발 중인 초소형 로봇, 경량 에어 펌프, 곤충 날개의 플랩핑 및 초소형 비행체의 조종면을 보여주고 있다. 특히 기존 공기 펌프는 무겁고 작동시 큰 소음과 진동을 유발하였으나, 경량 공기 펌프는 압전 작동기를 이용하여 중량, 소음과 진동을 작게 할 수 있다. 따라서 중량이 가볍고 소음과 진동이 작은 공기 펌프가 필요한 항공기나 우주선 및 이동형 공기 펌프로 적합하다.

향후 전망과 맺음말

최근에는 생체 모사를 위한 인공 근육형 작동기



(a) 기는 로봇

(b) 초소형 비행체 조종면

(c) 플래핑 기구

(d) 경량 에어 펌프

그림 16 LIPCA 작동기의 응용 연구

개발과 이들의 응용에 관한 연구가 매우 활발히 진행되고 있는데, 2002년 12월에 미국에서 열린 제1회 'World Congress on Biomimetic and Artificial Muscle' 과 2004년 7월에 있을 2차 학술 대회는 이를 반증하고 있다. 이러한 세계적 연구 추세에 따라서 작동기 기술을 더욱 개량하여 인공 근육에 가까운 작동기를 개발할 필요성이 대두되고 있다. 이 개념을 적용하여 인공 근육형 압전 작동기가 개발된다면, 새나 곤충과 같이 비행할 수 있는 소형 무인 비행체의 개발은 물론, 인간의 작동기구를 보조할 수 있는 인공기구, 예를 들면 인공심장 및 인공 팔 등의 생체-의공학 응용품을 개발하기 위한 연구분야에 과학 기술적으로 크게 기여할 것으로 예상된다.

현재까지 개발된 능동 작동기를 보면 해결해야 할 과제가 많이 있으며 인공 근육형 압전 작동기 개발에 회의적인 시각을 가지고 있는 연구자들도 상당수 있다. 그러나 목표 달성을 위하여 정진하는 많은 연구, 개발자들이 존재하므로 가까운 장래에 근육과 유사한 작동 성능을 가지는 능동 작동기를 개발할 수 있을 것으로 전망된다.