

전기 작동재료를 이용한 지능 구조물의 연구 및 개발 현황



윤 광 준

(건국대학교 항공우주공학과)

- '77 - '81 서울대학교 항공공학과 (학사)
- '81 - '83 서울대학교 항공공학과 (석사)
- '83 - '86 한국기계연구소 복합재료연구실 (연구원)
- '87 - '90 미국 Purdue University 항공우주공학과 (박사)
- '91 - 현재 건국대학교 항공우주공학과 교수
- '00 - 현재 과학기술부 지정 "능동구조/재료국가지정연구실" 연구실장

박 기 훈
(건국대학교 항공우주공학과)



- '96 - '00 서울산업대학교 기계설계학과 (학사)
- '00 - '02 건국대학교 항공우주공학과 (석사)
- '02 - 현재 건국대학교 항공우주공학과 (박사과정)



김 군 열

(건국대학교 항공우주공학과)

- '94 - '01 건국대학교 항공우주공학과 (학사)
- '01 - 현재 건국대학교 항공우주공학과 (석사)

1. 서 론

최근 압전 작동기와 같은 지능 구조물에 전기적인 제어기능이 추가된 지능 구조물(smart structure + electronics)의 개념이 제창되어 활발한 연구 개발이 이루어지고 있다. 지능 구조물은 구조재료, 감지기(sensor), 작동기(actuator)와 제어기(CPU)가 서로 복합된 구조재료로서 외부의 자극을 감지하여 그것에 필요한 대응 작동을 스스로 할 수 있는 자체제어 기능을 가지고 있다.

지능 구조물에 적용되는 재료는 그림1과 같이 발달되어 왔으며 대표적인 재료는 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(piezoceramic, PZT)과 압전 필름(polyvinylidene fluorides, PVDF)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.^[1,2]

압전 재료를 사용한 일련의 연구들이 많은 성

과를 거두었음에도 불구하고 이를 실제 구조물에 적용하는데 걸림돌이 되고 있는 것은 압전 작동기가 모터나 유압 작동기에 비해 해결하여야 할 문제점이 있기 때문이다. 단일 압전 작동기(unimorph piezoelectric actuator)의 경우 압전 재료의 최대 변형률이 작기 때문에 작동변위가 작고 반복적으로 사용할 때의 피로 문제가 발생하며, 높은 작동전압 때문에 주변 장치가 복잡해지는 등의 문제점이 있다. 이 중에서 압전 작동기의 작동변위가 작다는 문제는 최우선적으로 해결해야 할 과제로 지적되어 왔다. 일반적으로 압전 작동기가 기능적인 작동을 하기 위한 최소의 사양은 길이 변화가 300 μ m 이상, 작동력은 500N 이상이 되어야 한다고 알려져 있으나 현재 이를 만족하는 압전 작동기는 거의 보고되지 않고 있다.

EAP(electroactive polymers)의 경우 사용 가능한 종류가 적고 특히 제한된 성능 때문에 압전재료와 같은 다른 지능재료에 비하여 상대적으로 적은 관심을 받아왔다. 그러나, 최근 들어 큰 변위를 낼 수 있는 EAP가 개발되면서 관심을 끌게 되었는데, 이는 탄력이나 손상에 대하여 유연성이 있고 큰 변위를 낼 수 있는 점으로 인해 생물의 근육과 유사한 작동성을 갖고 있기 때문이다. 이러한 재료의 연구는 재료분야, 화학, 전기, 역학, 전자, 기계, 항공 등 다양한 학문 분야가 서로 연관되어 있다. 응용

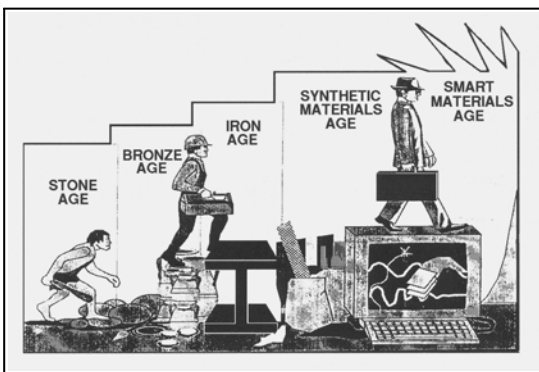


그림 1. 재료의 발달사

예로써 최근에 dust wiper, 소형 로봇 팔, 그리퍼 등이 있으며, EAP 작동기와 MEMS 기술을 복합하여 기거나 헤엄치거나 날아다닐 수 있는 초소형 곤충과 같은 운동체를 만드는 연구는 미래의 유망한 기술로서 많은 관심을 불러일으키고 있다. 현재 EAP의 작동능력의 향상에 대한 연구가 재료의 근본적인 레벨에서 수행되고 있으며, 이러한 노력은 새로운 제조기법과 아울러 재료의 성능을 정확히 이해하고, 성능향상을 위한 조건을 정하는 연구와 병행되어야 한다.

본 특집에서는 지능 구조물 중 현재 성능개선의 필요성이 가장 절실한 작동기 분야와 지능 작동기를 적용한 지능 구조물을 소개하고자 한다.

2. 지능 작동기의 연구 현황

2.1 압전 세라믹 작동기의 개발 추세

단일 압전 세라믹은 비교적 큰 작동력을 내지만 상대적으로 작은 변형률을 유발한다. 그러므로 큰 작동변위가 필요한 부분에는 적용하기가 어렵다. 이를 보완하기 위하여 여러 가지 구조 개념의 압전 작동기가 개발되고 있다.

2.1.1 바이모프(Bimorph) 작동기

바이모프 형태의 압전 작동기는 그림 2와 같이 두 개의 압전 세라믹의 팽창 방향을 반대로

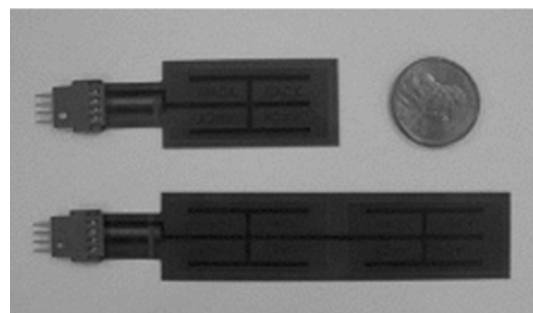


그림 2. 바이모프형 작동기(미국 ACX사 제품)

배열한 것으로 압전 세라믹의 인장-압축으로부터 굽힘을 유발하는 것이다. 이 압전 작동기는 상당히 큰 작동변위를 유발하지만 상대적으로 작동력이 작은 단점이 있다.

2.1.2 RAINBOW 작동기

RAINBOW(Reduced And Internally Biased Oxide Wafer)는 화학적인 반응을 통하여 PZT의 한쪽 면을 환원시킨 것이다^[3]. PZT를 그래파이트와 함께 넣고 975℃의 고온으로 가열하면 PZT와 그래파이트의 경계면에서 산소가 날아가 금속성의 비압전 재료층과 압전재료층이 일체의 구조를 갖게 된다. 이를 생각하면 두 층 사이의 열팽창 계수의 차이로 인하여 곡률을 가지게 된다. 이와 같이 성형된 곡면 압전 작동기의 경우 펌핑 동작(pumping motion)을 통하여 큰 작동 변위를 나타낸다. 그러나 외부 충격에 약한 단점을 가지고 있다.

2.1.3 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 발생할 수 있는 압전 세라믹 작동기로서, 그림 3과 같이 금속재료와 압전 박판으로 적층되어 있다^[4,5].

THUNDER는 스테인레스 스틸 위에 고온 경화용 접착제를 바른 후 압전 세라믹을 놓고, 그 위에 알루미늄 포일을 덮어 325℃에서 경화시킨 후 상온으로 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 작동변위를 발생시킨다.

THUNDER는 현재까지 개발된 유니모프형

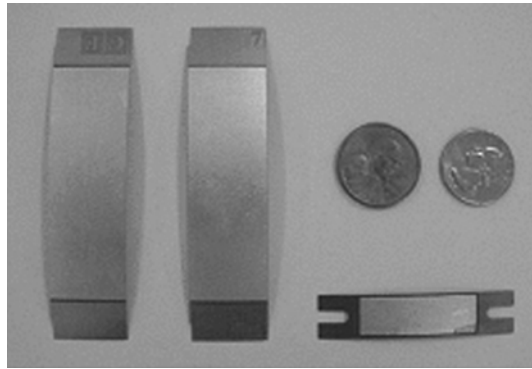


그림 3. THUNDER 작동기

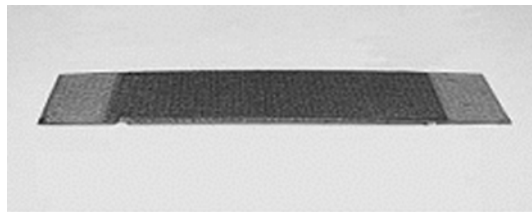


그림 4. LIPCA 작동기

작동기 중 가장 성능 좋은 작동기로 인정받고 있으나, 작동기 전체의 비중이 철과 비슷하여 항공우주용 작동기로 응용되기에는 무거운 편이다.

2.1.4 LIPCA 작동기

전국대학교 능동 구조/재료 연구실(Active Structure & Material Laboratory)에서는 그림 4와 같이 섬유강화 복합재료를 이용한 경량 곡면형 작동기 LIPCA(Lightweight Piezo-Composite Actuator)를 개발하였다^[6-9].

LIPCA는 전기장에 의해 변형되는 전기작동 압전 재료층을 중심으로 탄성계수 및 열팽창계수가 서로 상반된 섬유강화 복합재료를 적층시켜 177℃로 경화시킨 후 상온으로 냉각시키면, 각 구성 요소의 열팽창 계수 차이로 인하여 그림과 같은 비대칭 곡면 형상의 작동기 구조물을 얻게 된다. 작동기의 전극을 통하여 전기장이 인가되면 세라믹층의 변형으로 인해 작동기 중앙부에서 작동변위가 유발된다.

LIPCA의 경우 섬유강화 프리프레그가 접착

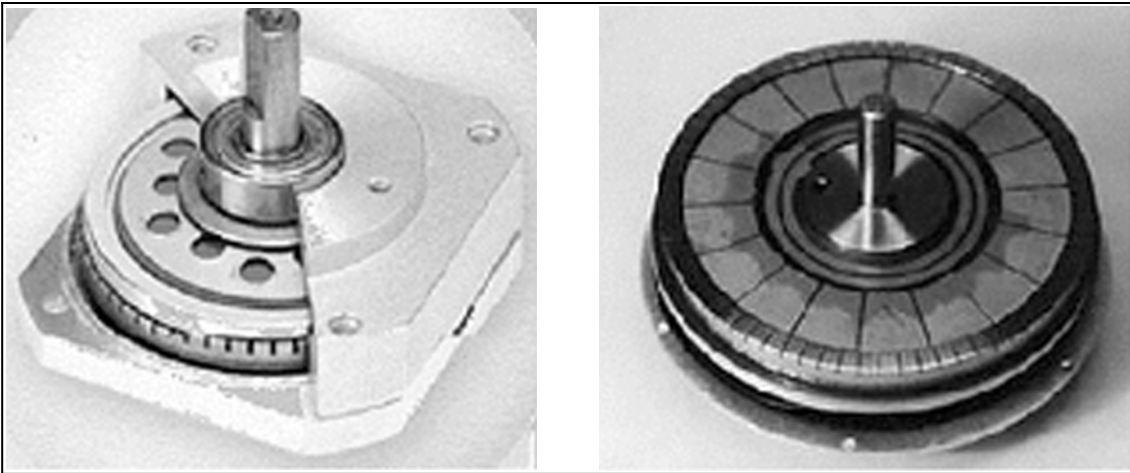


그림 5. Traveling Wave Ultrasonic Motor 형상

제 역할을 하기 때문에 제작과정이 단순하며, THUNDER 보다 40%이상 경량이다. 또한 복합재료의 맞춤설계를 적절히 이용하면 원하는 형상과 구조적 성능을 가질 수 있기 때문에 다기능 구조물에 효과적으로 응용될 수 있는 장점이 있다.

2.2 기구학적 구조의 압전 작동기

이 작동기는 기구학적인 개념을 원용하여 압전 세라믹의 작은 작동변위로부터 큰 변위를 유발하는 것이다.

2.2.1 초음파 모터

(Traveling Wave Ultrasonic Motor)

초음파 모터 TWUM(Traveling Wave Ultrasonic Motor)은 그림 5와 같은 둥근 형태로서 압전 세라믹층과 금속재료 층으로 이루어진다. 구동원리는 초음파 모터 안쪽에 있는 압전 세라믹층에 전극을 인가하여 형성되는 전기적인 왜곡을 이용한다. 여기서 전기적인 왜곡이란 압전 세라믹층에서 발생하는 초음파 진동으로부터 다른 매질과의 마찰을 유도하여 운동에너지를 변환시킨다는 것으로 전기적 에너지가 물리적 에너지로 전이되는 현상이다. 즉 그림 5

와 같이 여러 부분으로 나누어진 압전 세라믹층에 교차된 폴링과 전압위상을 다르게 주어 traveling wave를 생성시키고, traveling wave에 의해서 rotor와 stator의 표면에 마찰력이 발생하여 rotor가 회전하게 됨으로써 작동변위를 유발하게 된다. 초음파 모터는 자석이나 권선을 필요로 하지 않는 단순한 형태의 구동원이며, 응답성이 일반적인 모터에 비해 뛰어나다. 또한 저속 회전시 큰 토크를 필요로 하는 다이렉트 드라이브가 가능하며, 자석이나 권선을 사용하지 않기 때문에 자장에 강한 장점을 가지고 있다. 반면 압전 세라믹층과 금속재료의 마찰을 구동원으로 이용하기 때문에 내구성이 떨어지고 열이 발생하여 작동 효율이 저하되며, 주 동력원인 압전소재가 고가라는 문제점을 가지고 있다.

현재 원자로와 같은 핵 시설에서의 방사선에 대한 내성을 감안한 장비의 회전 및 이동 소형 및 경량이라는 점과 정밀한 위치제어가 가능하므로 소형 작동기를 필요로 하는 정밀 기계 또는 카메라의 줌렌즈의 초점 제어 등에 사용하고 있다.

그밖에도 사진기의 초점 거리를 바꾸는데 많이 쓰이는 인치웜 모터를 사용한 작동기와 같은 메조스케일 작동기 등이 있다. 인치웜 모터

는 한쪽 끝을 잡은 상태에서 PZT의 길이를 늘린 후 반대편을 잡고 처음에 잡고 있었던 부분을 놓아 이동하는 방식의 작동기로 기본 개념은 90년대 초반부터 나타난 것으로 이론적으로는 무한대의 변위를 낼 수 있다. 작동력의 관점에서 보면 30mm정도 크기의 압전 작동기의 경우 0.035~4.5kgf를 내는 것으로 알려져 있다. 이를 MAD 작동기(mesoscale actuator device)^[10]라고 부른다.

2.3 Electroactive polymers의 연구 동향

EAP(electroactive polymer) 재료는 전기 입력에 의해 변형하는 재료로서 지금까지 발표된 재료를 정리해보면 크게 전기장에 의해 작동되는 것(PVDF)과 이온화에 의해 작동되는 것(IPMC), 유연학적 유체, 나노 및 분자크기의 EAP 등으로 나눌 수 있다.

2.3.1 압전필름 PVDF(Polyvinylidene Fluoride)

PVDF는 유연성이 좋고 박막으로 만들 수 있고, 낮은 음향임피던스를 가지며 견고한 반면에 전기-기계적 연성계수가 작은 특징을 갖고 있다. PVDF는 결정체 도메인이 서로 다른 4개의 형태를 갖는 반결정체 폴리머이다. 이러한 다른 형태들은 열이나 전기장이나 압력이 인가됨에 따라 서로 뒤바뀐다. 열 분극화나 코로나 분극화는 결정체의 분자극성을 정렬해 주어 영구적인 분극을 형성하여 준다. 이 분극화가 PVDF의 압전효과를 일으키게 한다. 그림 6은 바이모프 형태의 작동기로서 5%이상의 변형을 얻을 수 있고 1GPa 이상의 탄성계수를 가지고 있으며 100kHz 이상까지도 작동이 가능하다.

그림 7은 electrostrictive polymer artificial muscle(EPAM)으로서 두 개의 유연 전극 사이에 탄성 중합체를 적층시키고 상하의 두 전극 사이에 전위차를 걸어 주면 폴리머는 두께 방향으로 눌려지면서 평면 방향으로 늘어난다. 이



그림 6. PVDF를 기본으로한 바이모프 작동기

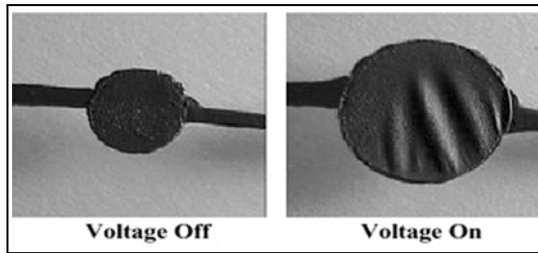


그림 7. EPAM을 이용한 작동기

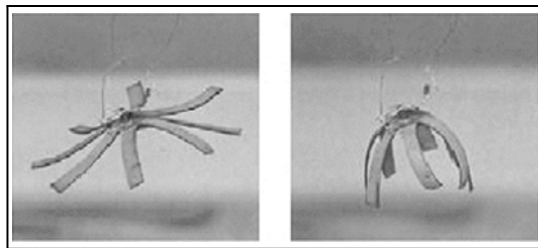


그림 8. IPMC를 이용한 손가락형상의 그리퍼

변형은 전기장의 자유전하로 인한 정전기력에 기인한 것으로 알려져 있다. 3M사에서 제작하는 VHB4910 acrylic 탄성 중합체를 사용했을 경우 양방향 대칭의 제한 하에서 300%이상의 평면 변형을 일으키고 한 방향으로서는 215%의 변형을 일으킴을 발견하였다^[11].

2.3.2 Ionic Polymer Metallic Composite (IPMC)

IPMC는 낮은 전기장이 인가되었을 경우 큰 굽힘 변형을 내는 EAP로서 현재 주로 사용되는 것으로는 금속성 전극이 입혀진, 기본 폴리머가 Nafion인, perfluorinated IPMC로서, 그 제조 방법은 먼저, 테프론 기저의 폴리머에 금속성 이온을 집어넣고 그 위에 전극을 입힘으로서 완성된다. 전극은 유연성이 있어야 하며 일반적으로 도금기법으로 만들 수 있으나 이온

교환법에 의해 만드는 것이 더 좋은 것으로 알려져 있다. IPMC는 습기가 있는 환경에서 작동하므로 건조한 환경에서 쓰기 위해서는 밀봉이 필요하다. 미국에서는 IPMC를 이용하여 손가락을 흉내내기 위하여 그림 8과 같은 그리퍼를 제작하였다^[12].

2.3.3 Conducting Polymer

도전성 폴리머(conducting polymer)는 지능 재료 시스템에 요구되는 성질들을 갖고 있으므로 새로운 기능성 재료로서 각광 받고 있다. 도전성 폴리머는 주위환경의 변화에 능동적으로 응답하며 작동할 수 있다. 주위 환경의 변화를 감지하는 감지기의 신호응답이나 변위와 같은 기계적 응답, 투자율의 변화와 같은 물리적 응답을 할 수 있는데, 물리적 응답을 응용하면 빛의 흡수나 방출에 의한 광전기 장치, 발광다이오드 등의 새로운 제품을 만들 수 있다. 도전성 폴리머에는 polypyrrole(PPy), polyaniline(PANI) 그리고 Polythiophene(PTh)의 3종류가 주로 지능재료로 이용되고 있다. 이들의 공통된 특징은 복합된 backbone구조와 2-3 방향단위당 양전하를 발생시키는 산화된 고분자 형태를 들 수 있다. 이러한 두가지 특징 때문에 전기전도도는 $10^{-2} \sim 10^3 \text{ s/m}$ 의 범위를 갖게 된다.

호주의 Wollongong 대학에서는 solid polymer electrolyte(SPE)이나 hydrogel을 이용하여 작동기를 개발하였다^[13]. PPy를 먼저 금 도금된 마일라 전극에 전기화학적으로 성장시키고 이것을 SPE나 hydrogel에 적층시킨 후 마일라를 벗겨낸다. 이렇게 3층 구조를 만들어서 굽힘 형태의 작동기를 만들었는데, PPy 전극 사이에 1.5V를 가했을 때 90°이상의 굽힘을 만들 수 있다(그림 9).

Electroactive polymer형태의 경우 작동변위와 빠른 응답속도를 가졌으나, 실제 사용시 수많은 제약요소들이 산재해있다. PVDF의 경우 1kV의 이상의 고전압이 필요하며, IPMC의 경

우는 낮은 전압에서 사용하는 대신 작동시 습기가 필요하다. 또한 폴리머 형태의 작동기인 경우 부착된 전극의 연신율이 폴리머의 큰 작동변위에 미치지 못하고 있어 많은 문제를 발생시킨다. 이러한 문제가 해결된다면 보다 더 생체근육에 가까운 작동체를 개발할 수 있을 것이다.

3. 지능 구조물의 연구 현황

3.1 항공우주분야

최근 압전재료, 형상기억합금, electroactive polymer 등을 작동원으로 한 지능구조물의 적용이 항공우주분야에서 활발히 시도되고 있다.

적층형 압전 복합재료 작동기는 세라믹의 특성상 커다란 항공우주 구조물보다는 소형 무인항공기나 소형 미사일의 자세 제어용 작동기에 적합하다. 그림 10은 미국 Kentucky 대학에서 UAV (unmanned aerial vehicle) 및 MAV(micro aerial vehicle)의 조종면 제어를 위해 압전 재료를 적용시킨 것이다^[14]. 익형에 사용된 압전 작동기는 THUNDER 7R로서 작동전압은 약 500Vpp이며, 압전 작동기 작동시 익형의 표면형상이 변화되어 박리점이 익형 끝단으로 이동되어 양항비가 개선된다.

형상기억합금의 경우 반응속도는 느리지만 큰 작동력과 변위를 가지기 때문에 유인 및 무인항공기의 조종면 적용이 가장 현실적이다. 항공기의 날개 구조물에 형상기억합금을 적용함으로써 익형의 형상이 비행환경에 맞게 변형되어 최적의 비행성능을 보장하게 된다. 이러한 익형은 기존의 가변익형(swing wing)보다 발전된 익형형태로서 morphing structure라고 한다. 이 구조물은 전기적/화학적 자극에 형상이 변화하며, 구조물의 작은 형상 변화로부터 아주 큰 형상의 변화까지 가능하다^[15-17].

DARPA 지원하에 시스템 차원에서 세가지

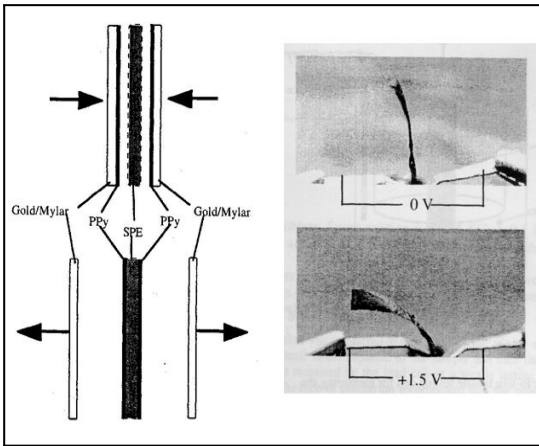


그림 9. Conducting Polymer를 이용한 작동기

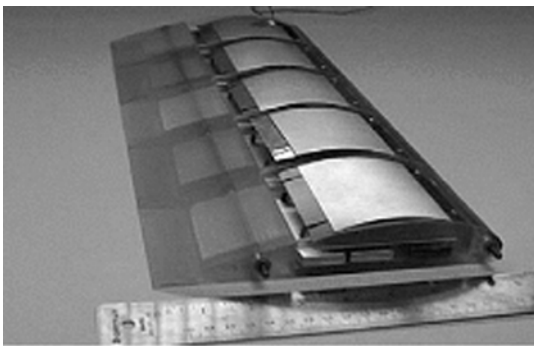


그림 10. 압전 작동기를 적용한 Wing Module

지능 구조 기술에 대한 연구가 수행되었다. Boeing의 지능형 로터 프로젝트(Smart Rotor Project)에서는 지능형 뒷전 플랩을 사용하여 MD 900 헬리콥터 실물크기의 블레이드에 대한 연구가 수행되었으며, 마하 스케일 CH-47 헬리콥터 로터 시스템에 능동 섬유 복합재료(Active Fiber Composites)를 통합하였다. 또한 제작된 시스템은 Boeing의 VSTOL 풍동에서 Hovering 시험을 통하여 양력이 향상되고 진동이 감소됨을 입증하였다.

그림 11은 Smart Wing 프로그램하에서 Northrop Grumam의 30% 크기 모델UCAV가 NASA(LaRC)의 Transonic Dynamics Tunnel에서 실험되고 있는 형상이다. 실험을 통해 보조날개 롤링 모멘트의 공력탄성학적 감소현상은 contoured trailing edge와 hingeless

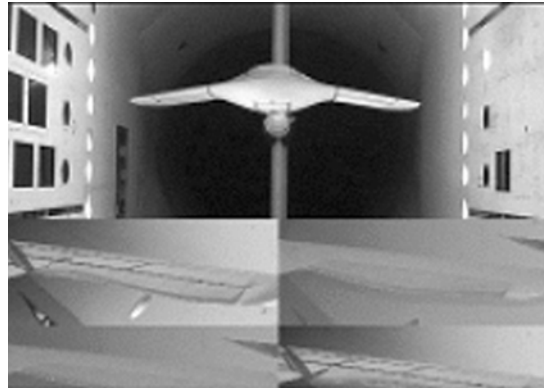


그림 11. 병형된 Morphing Structure 형상

leading edges를 편향시켜 균형을 유지할 수 있음이 입증되었다.

재료 분야에서는 주로 섬유 복합재료에 그 초점이 모아졌다. Continuum Control 에서는 압전 섬유 복합재료를 위한 자가 동력 전자패키지를 개발하였다. NASA(LaRC)에서는 섬유 복합재료 작동기를 개발하였으며, MIT에서는 저가의 고성능 압전 섬유재료로 이어질 수 있는 변형도가 큰 압전 산화물 단결정 섬유를 개발하였다. 이는 Active Fiber Composite 형태로 압전 세라믹과 폴리머를 파우더 형태로 만들어 일방향 섬유 모양으로 만든후 S-Glass를 이용하여 보강한 형태이다. 그러나 AFC는 폴리머 형태이기 때문에 박판형 압전 세라믹을 사용했을 때 보다 작동력이 감소하게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위해 0.0005인치 두께의 캡톤 필름에 Interdigitated 전극 패들을 도포하여 압전 세라믹의 d33방향 특성을 향상시킴으로써 작동변위를 증대시켰다. 해석기법 또한 발전이 있어 Arizona 대학에서는 혼용 변위 이론을 개발하였으며, Penn State 에서는 지능구조물의 시뮬레이션과 최적화를 위해 Rayleigh-Ritz법과 경계 요소법에 기반을 둔 수치기법을 제안하였으며, Roma 대학에서는 적용 구조물과 적층 복합재료를 통합한 적층 셸 모델을 개발하였다.

요소기술 연구분야에서는 DARPA가 제안한

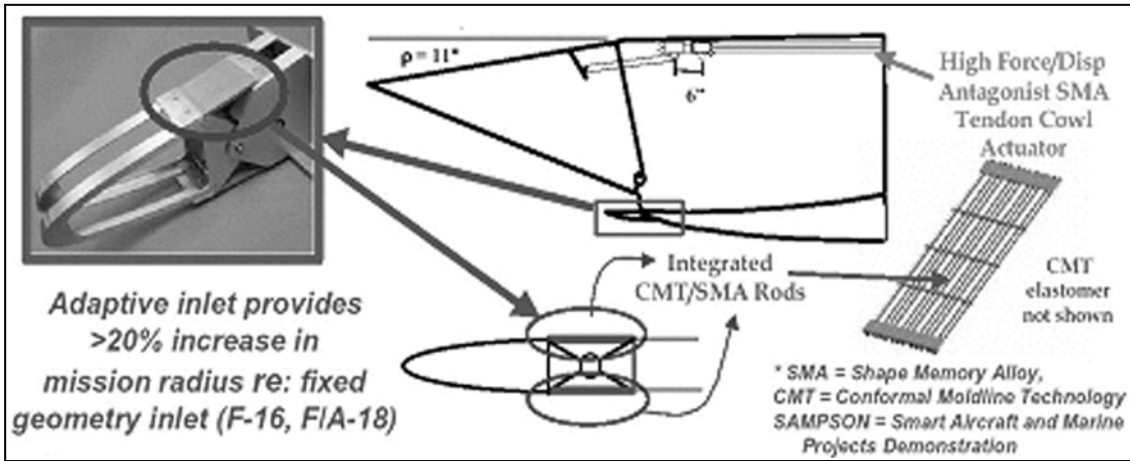


그림 12. F-15 카울에 SMA를 적용한 형상

compact hybrid actuator program에 힘입어 크게 고무되었다. 이 프로젝트는 Active Control Experts, Active Signal Technologies, Burleigh Instruments, Concepts ETI, HRL Labs, Mide Technology, Penn State, 그리고 Michigan 대학과 Washington 대학이 선정되었으며, 작동기의 변위와 힘을 기준에 맞추기 위하여 각 팀들은 각자 독특한 증폭기술을 가지고 하나 이상의 물질을 결합하여 작동기를 설계하고 있다.

또한 DARPA(Defense Advanced Research Projects Agency), Boeing, NASA는 SAMPSON 프로그램에서는 실제 크기 F-15 공기흡입구 카울과 압전을 작동시키는 실험을 수행하였으며, 형상기억합금으로 만들어진 공기흡입구 변형에 대한 실험을 수행하였다.

Auburn 대학에서는 적응 재료들을 다양한 항공우주 시스템에 적용하였다. 마하 9로 비행하면서 33G를 견딜 수 있는 미사일 요격기용 조종면에 대한 연구를 수행하였으며, Stuttgart 대학과의 협력하에 비행 조종면에 적응 재료를 적용하여 2대의 곡예용 UAV를 설계제작, 비행 시험을 하였다. 회전익 형태의 Micro-UAV도 비행 시험을 수행하였으며, 마하 0.2~3.8상에서 균용으로 설계된 3가지 적응구조 형태에 대한 풍동실험을 수행하였다.

NASA-Dryden 연구소에서는 18인치 half-span composite 모델을 이용하여 플러터 비행 시험을 수행하였다. 실험용 날개는 NASA의 F-15B 중양에 장착되었으며, 비행시 가진을 위하여 분포 압전 작동기를 이용하였다. Penn State, Cornell 대학과의 협력 하에 Maryland 대학은 세 가지 능동 로터 개념을 입증하였다. 바이모프 압전소자로 작동되는 뒷전 플랩과 블레이드 끝단 비틀림 작동기, 스택형 작동기를 이용한 플랩을 이용하여 뛰어난 진동억제 효과를 얻었다. Penn State에서는 압전효과를 이용한 에너지 수확 회로를 연구하였다.

NASA(LaRC), JFL, AFIT, Virginia Univ, Kentucky Univ, Lgarde 연구그룹은 벤치 테스트를 위해 지능형 작동기를 전개 구조물에 적용시켰다. AFIT/Virginia 대학에서는 이러한 시스템을 모델링하고, 전개 빔/트러스 지지구조물과 광학용 적응 박막을 유한요소화 하였다. AFIT와 Cornerstone 연구그룹은 형상기억 폴리머를 자가전개(self-deploying) aperture에 적용하였다.

DARPA의 CHAP(Compact Hybrid Actuator Program)은 지능 구조물의 획기적인 발전 전기를 마련하였다. Active Signal Technologies/Moog에서는 압력이 1800psi보다 높고,

0.86cis로 흐르는 고주파 펌프 밸브를 개발하였으며, Burleigh Instruments사와 UCLA 대학에서는 분해능이 1nm이고 12mm움직이며, 0.4W로 18mm/sec의 속도와 작동력 45N 성능을 발휘하는 모델 모터를 개발하였다. CAS Engineering, Rhombus Consulting Group, Trisys, JPL, Warner Precision, UTRC, Maryland 대학 협력팀은 2인치 이상 작동되며 1000lb 이상의 힘을 낼 수 있는 압전 유압 기기의 가능성을 입증하였다.

HRL Labs, Raytheon, UCLA 대학에서는 수동 체크밸브와 NiTi SMA 필름을 이용하여, 높은 주파수 대역폭을 가지는 소형펌프를 개발하고 있다. 이 펌프는 70Hz에 약 50psi의 출력압력을 가지고 있다. Kinetic PSU, VPI, Boeing, MPC Products 연구팀은 효율적 전자장치와 진동 압전세라믹에 의해 작동되는 기계적 래칭 모터를 개발하여 11배의 비출력 증가를 이루었다. Washington 대학은 40mm 움직이고, 1N의 힘을 낼 수 있는 다결정구조 Fe-Pd 스프링 작동기를 개발하였으며, 더욱 가격경쟁력 있는 Ferromagnetic SMA Composites를 개발 중에 있다.

그림 13은 미국 Perdue Univ, AFRL, NASA(LaRC)가 공동으로 연구 개발하고 있는 무인항공기의 형상이다. 개발 중인 무인항공기는 조종면을 형상기억합금 제어기와 다축날개피봇을 이용함으로써 제어 시스템을 간략화 하고 비행체의 임무 수행시 날개 형상을 자연 상태의 날개 형상

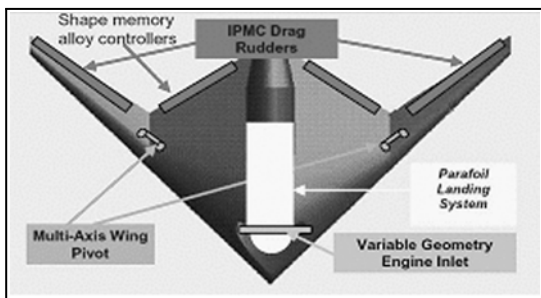


그림 13. Smart Wing이 적용된 무인항공기

에 근접시켰다. 이와 같이 지능재료를 능동적으로 활용한 날개 구조의 비행체가 개발된다면 현재까지의 항공기에 적용하고 있는 비행 원리가 근본적으로 바뀌어 새나 곤충의 비행 원리를 따르는, 이착륙이 용이하고 방향전환이 보다 자유로운 획기적 비행 능력을 갖게 될 것이다. 또한 지능 구조물의 적용으로 인해 항공기의 소음억제, 성능향상, 시스템 모니터링, 비행환경, 비행임무에 따른 성능의 향상을 도모할 수 있다^[18-20].

3.2 기타 분야

미국 해군연구소(ONR)는 잠수함의 외벽에 압전재료를 이용한 스마트스킨(smart skin)을 부착하여 잠수함의 소음과 진동이 외부로 전파되지 못하도록 하는 스텔스 기능의 지능 구조물을 개발하고 있는 것으로 알려지고 있으며, 그 외에 그림 14~16과 같이 압전재료 작동기를 응용한 flapping, mobile robot등이 연구되고 있다.

그림 14는 미국 Vanderbilt 대학에서 THUNDER 작동기를 Mesoscale Robotic Insect에 적용시킨 것이다. 구조가 간단하면서도 경량인 THUNDER 작동기를 플래핑(flapping) 형태의 구조물에 적용시킴으로서 Mesoscale Flying Insect의 가능성을 확인할 수 있다.

그림 15는 건국대학교 능동 구조/재료 연구실에서 LIPCA 작동기를 활용하여 개발한 crawling robot으로 작동원리는 작동기의 수직 방향 변위를 기구학적으로 이용하였다. 현재는 외부 전원에 의해 거동하지만 추후 자체 동력 공급 장치를 개발하여 탑재할 예정이다. 로봇의 무게는 20g이며, 추후 탑재될 전원 공급장치의 무게는 약 60g정도로 예상하고 있다.

그림 16은 미국 Vanderbilt 대학에서 THUNDER-7R 작동기를 이용하여 제작한 biomimetic robot으로 구동에 필요한 자체 전원

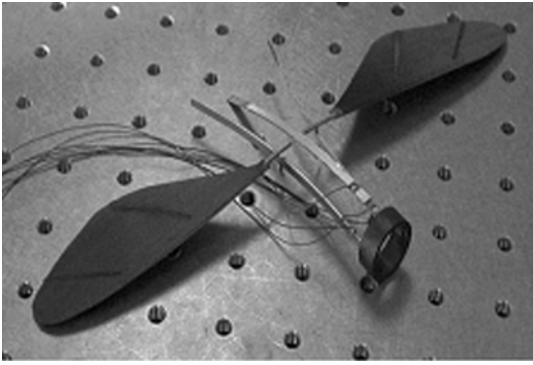


그림 14. Mesoscale Flying Insect 형상

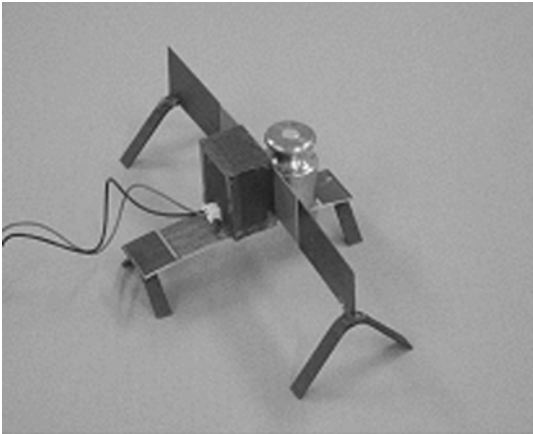


그림 15. Crawling Robot 형상

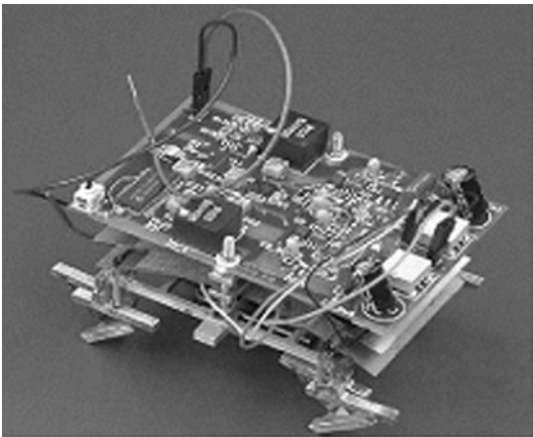


그림 16. Biomimetic Robot 형상

이 탑재되어 있다. 로봇의 무게는 전원공급장치를 제외한 50g이며, 작동전압은 교류 $\pm 240V$ 에서 작동하고, 최고 속도는 300mm/sec이다. 이때의 작동 주파수는 32Hz이며, 1400mW의 전력이

사용된다. 이와 같은 종류의 로봇은 항공우주분야를 비롯한 다양한 분야에 걸쳐 연구되고 있다.

4. 결 론

미국의 DARPA에서는 1999년부터 3년간 3500만불의 연구비를 투입하여 현재보다 10배 이상의 성능을 가지는 작동기의 개발을 CHAP으로 지원하고 있다. 여기에서 10배의 성능이라는 요구조건은 현재의 작동재료나 작동기 구조의 개념이 혁신적으로 개선되어야 한다는 의미로 작동기 기술 분야에서 혁신적 기술의 필요성을 강조하고 있다. 이러한 작동기는 전통적인 방법으로는 불가능한 것으로 새로운 개념의 작동기가 출현되어야 가능할 것으로 생각된다.

이와 같은 고성능 경량 작동기가 성공적으로 개발될 경우, 로봇 산업 분야의 정밀제어 로봇 팔, MEMS 분야의 초소형 정밀 작동기 등의 분야에서 대량으로 소요될 것으로 전망된다. 또한 기존의 회전 모터나 유압식 작동기를 대체하여 항공기나 미사일 조종면 날개 작동 시스템과 로봇의 작동 시스템 등에서 혁신적인 변화를 가져올 것이다.

참 고 문 헌

1. 라완규, 곽문규, 윤광준, "압전 감지기와 작동기를 이용한 복합재료 격자 구조물의 능동 진동 제어," 한국복합재료학 회지 제 25권 5호, pp.76-85, 1997.
2. 박기훈, 윤광준, 박훈철, "압전재료가 적용된 지능복합재료 작동기 개발 현황" 한국복합재료학회지 제15권 2호, pp.55-63, 2002.
3. Haertling, G.H., "Rainbow Actuator and Sensors: A New Smart Technology," Proc. of SPIE Conference, San Diego, CA, 3-4 March, Vol. 3040, pp.81-92, 1997.
4. Mossi K.M. and Bishop. R.P., "Cha-

- racterization of Different Types of High Performance THUNDER Actuator", Proc. of SPIE Conference, Newport Beach, CA 1-5 March, Vol. 3675-05, 1999.
5. Hellbaum, R., Bryant, R.G., and Fox, R.L. "Thin Layer Composite Unimorph Ferroelectric Driver and Sensor," United States Patent No. 5,632,841, 1997.
 6. Yoon, K.J. Park H.C. and Shin, S.J., N.S. Goo "Design and manufacture of a lightweight piezo-composite curved actuator," Smart Materials and Structures, Vol. 10. 2001. pp. 1-6.
 7. Goo, N.S. Kim, C. Kwon Y.D. and Yoon, K.J. "Behaviors and Performance Evaluation and Optimal Design of Lightweight Piezo-composite Curved Actuator," Journal of Intelligent Material System and Structures (in print).
 8. 박기훈, 윤광준, 박훈철, "곡면형 압전 복합재료 작동기 LIPCA 개발" 한국항공우주학회지 제 30권 5호, pp.94-100, 2002.
 9. 김승한, 최승복, 정재천, "압전필름을 이용한 외팔보의 능동진동제어," 한국항공우주학회지, 제 21권 5호, pp.26-36, 1993.
 10. Chen, Q., Yao, D.J., Kim, C.J., and Carman, G.P., "Mesoscale Actuator Device: Micor Load," Sensors and Actuators, Vol. 73, 1999, pp. 30-36.
 11. Korbluh, R. Pelrine, R. Pei Q. and Shastri, V. "New class of dielectric elastomer produces extremely large strain and Energy response," Worldwide Electroactive Polymers, Y. Bar-Cohen Ed., 2(1), 11-12, July, 2000.
 12. Shahimpoor, M. Bar-Cohen, Y. Simson J.O. and Smith, J. "Ionic polymer-metal composites(19MCs) as biomimetic sensors, actuators and artificial muscles-a review," Smart Materials & Structures, 7, R15-R30, 1998.
 13. Barisci, J. N. Lewis, T. W. Spinks, G. M. Too C. O. and Wallace, G. G. "Responsive system based on conducting polymers," Proc. on Smart Materials, Structures, and Integrated Systems(SPIE), Vol. 3241, 10-19, Adelaide, Australia, December 1997.
 14. Munday, D. and Jacob, J. "Active Control of Separation on a Wing with Conformal Camber," AIAA Journal 2001-0293.
 15. Carotenuto, R., Lamberti, N., Iula, A., and Pappalardo, M., "A New Linear Piezoelectric Actuator for Low Voltage and Large Displacement Applications," Sensors and Actuators, Vol, 72, 1999, pp. 262-268.
 16. Jones, L.D. Newton, D.V. and Garcia, E. "Adaptive device for precise position control", Proc. of the International Society for Optical Engineering (SPIE) 1917 (1993) 648-659.
 17. Crawley, E.F. and De Luis, J., "Use of Piezoelectric Actuator as Elements of Intelligent Structures," AIAA Journal, Vol. 25, No. 10, 1987, pp. 1373-1385.
 18. Scott, R.C. and Weisshaar, T.A., "Controlling Panel Flutter using Adaptive Materials," AIAA-91-1067-CP, 1991, pp. 2218-2229.
 19. Tzou, H.S. "Integrated Distributed Sensing and Active Vibration Suppression of Flexible Manipulators using Distributed Piezo-electrics," J. of Robotic Syst., Vol. 6, 1989, pp. 746-767.

20. Baz, A., Iman, K. and McCoy, J., "Active Vibration Control of Flexible Beams using Shape Memory Actuator," Journal of Sound and Vibration," Vol. 140, No. 3, 1990, pp. 437-456.