

特輯

**압전재료가 적용된 지능복합재료 작동기 개발 현황**

박기훈\*, 윤광준\*, 박훈철\*

**1. 서론**

1990년대 초부터 복합재료 내부 자체에 제어기능이 추가된 지능복합재료(composite materials + electronics) 개념이 제창되어 활발한 연구 개발이 이루어지고 있다. 지능복합재료는 구조재료(structure), 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 대표적인 재료를 보면 압전 재료(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 압전 재료로 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.

본 특집에서는 스마트 구조물 중에 현재 성능개선의 필요성이 가장 절실한 작동기 분야를 소개하고자 한다. 지능형 압전복합재료 작동기는 항공기, 미사일 구조물의 조종면 작동이나 유연 대형 우주 구조물의 진동 억제제를 위해 사용되는 것으로, 최근 들어 항공기나 해양 구조물의 조종면 작동이나 구조물의 진동 제어를 위하여 큰 응력을 발생시키는 단일 압전 작동기(monolithic piezoelectric actuator)가 널리 연구되어 왔다. 그러나 단일 압전 작동기는 변형률이 작기 때문에 큰 작동 변위를 나타내지 못하며, 작동기가 반복적으로 작동할 때의 피로문제를 해결해야 하는 단점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위한 노력으로 바이모프

(Bimorph)압전 작동기, 수축된 내부 물성변화 산화물 세라믹층을 이용한 압전 작동기 RAINBOW(Reduced And Internally Biased Oxide Wafer)[1], 박판 형태의 유니모프 작동기 THUNDER(THin layer UNimorph Deiver)[2,3]등이 제작되어 사용되고 있다.

압전재료와 섬유강화 복합재료를 이용한 박판 유니모프 작동기 LIPCA(Lightweight Piezo composite Curved Actuator) [4,5]는 동종의 압전 작동기 THUNDER의 금속재료층 부분을 경량 섬유강화 복합재료 층으로 대체하여 경량화 하였으며, 섬유의 보강방향과 적층 순서를 최적화 함으로써 작동 성능을 증대시켰다. 또한 섬유강화 복합재료를 사용함으로써 작동기의 방향성 및 크기를 조절할 수 있게 되어 설계의 유연성을 가지게 되었다.

압전재료의 특성에 적합하게 개발된 지능형 구조물 작동기는 소형 항공기나 미사일의 조종면 제어 작동기로 응용되어 상대적으로 무겁고 구조가 복잡한 기존의 회전 모터나 유압장치를 대체하여 항공기나 미사일의 성능을 높일 수 있으며, 기계 장치의 밸브, 펌프, 스위치, 진동억제 및 발생기, 소음 제거기 등의 작동기에 응용 될 수 있고, 압력, 힘, 유체흐름, 변위 측정 및 음파 탐지기에 응용 될 수 있다. 특히 지능재료를 능동적으로 활용한 날개 구조의 비행체가 개발된다면 현재까지의 항공기에 적용하고 있는 비행 원리가 근본적으로 바뀌어 그 비행체는 새나 곤충의 비행 원리를 따르는 이착륙이 용이하고 방향전환이 보다 자유로운 획기적 비행 능력을 갖게 될 것이다. 또한 지능구조물을 인공위성 구조물에 적용하면, 음지 (-150℃)에서 양지 (+100℃)로 들어설 때 급격한 온도변화에 의한 열변형 진동 때문에 발생하는 문제들을 구조물 자체가 능동적으로 대응하여 해결할 수 있게 되어, 위성의 성능 향상과 수명 연장에도 큰 효과를 가져올 것이다. 지능 구조물에 대한 연구는 Bailey와 Hubbard [6]의 연구와 Crawley와 De Luis [7]의 연구에서 실현 가능성을 확인할 수 있었다. 이후 국내외적으로 많은 연구자들이 이 분야의 연구를 수행하고

\* 건국대학교 항공우주공학과 능동구조/재료 국가지정연구실

있다[8-22].

압전재료를 사용한 일련의 연구들이 많은 성과를 거두었음에도 불구하고 이를 실제 구조물에 적용하는데 걸림돌이 되고 있는 것은 압전 작동기가 모터나 유압 작동기에 비하여 해결하여야 할 문제점이 있기 때문이다. 단일 압전 작동기(unimorph piezoelectric actuator)의 경우 압전재료가 최대 변형률이 작기 때문에 작동 변위가 작고 반복적으로 사용할 때의 피로 문제가 발생하고 작동 전압이 높기 때문에 주변 장치가 복잡하다는 등의 문제점이 있다.

이러한 문제점 중에서 압전 작동기의 작동 변위가 작다는 것은 해결하여야 할 최우선 과제로 지적되어 왔다. 압전 작동기가 기능적인 작동을 하기 위한 최소의 사양은 길이 변화가  $300\mu\text{m}$  이상, 작동력이  $500\text{N}$  이상이 되어야 한다고 알려져 있으나 현재 이를 만족하는 압전 작동기는 거의 보고되지 않고 있다.

## 2. 압전재료의 동작 원리

압전 효과(piezoelectric effect)란 어떤 종류의 결정판에 일정한 방향으로 압력이 가해지게 되면 결정판의 양면에 외력에 비례하는 양전하와 음전하가 나타나는 현상을 말한다. 수정에서 결정판을 잘라내어  $x$ 축 또는  $y$ 축을 따라 압력을 가하면 결정판의 양면에는 각각 전하가 발생하며, 장력을 가할 때에는 이것과 반대 부호의 전하가 생긴다. 이러한 현상은 1880년 Pierre Curie와 Jacques Curie에 의하여 처음 발견되었으며 자연 상태에서는 수정(quartz), 황옥(topaz), 로셴 소금(rochelle salt) 등의 결정체가 압전 현상을 나타낸다. 자연 상태의 압전재료는 그 효과가 그리 크지 않으므로 공학적인 의미가 없으며, 1974년 압전 세라믹이 발견된 후에야 공학 분야에 응용되기 시작하였다. 압전 세라믹은  $\text{BaTiO}_3$ 와 같은 강유전체 다결정질 재료와 압전 성능을 향상시켜 주는 Lead Zirconate Titanate으로 이루어져 있다.

결정을 가진 고체에 응력을 주면 그 결정의 반대편에 음양의 전하가 발생하는데 이 전하량은 응력에 비례하며, 응력의 방향이 바뀌면 발생하는 전하는 부호도 바뀐다. 또한 외부에서 결정판에 전압을 공급해주면 변위가 발생하게 된다. 발생하는 변위의 크기는 전압에 비례하며, 공급 전압의 방향을 반대로 바꾸어 주면 변형도 반대로 바뀌게 되는데, 이런 현상을 압전 현상(piezoelectric phenomena)이라 한다.

Fig. 1은 압전 소재의 역방향 효과를 나타내는 것으로 전압을 가하였을 때의 변형 형상을 나타낸다. 그림에서는

압전 재료의 폴링 방향과 반대 방향으로 전압을 걸어 준 것으로 폴링 방향으로는 압축 변형이 일어나고 그와 수직한 방향으로는 인장 변형을 일으킨다. 이와 반대로 전압을 폴링 방향과 같은 방향으로 걸어 주게 되면 폴링 방향으로는 인장 변형, 그와 수직한 방향으로는 압축 변형이 일어나게 된다. 압전 작동기는 이렇게 압전 재료에 전압을 가하였을 때 발생하는 변형률을 이용한 것이다.

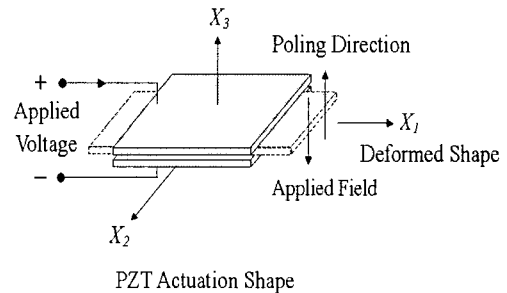


Fig. 1 압전재료의 압전변형 개념도.

변형의 크기는 압전 변형률 상수(piezoelectric strain constant)와 관계가 있다. 압전 변형률 상수는 가해진 전압에 대한 발생한 변형률의 비로 정의된다. 작동 응력은 강성계수를 곱한 압전 응력 상수(piezoelectric stress constant)와 관계된다.

압전 변형률 상수의 값을 보면 대략  $100\sim 200 \times 10^{-12} \text{m/V}$ 로서 두께가  $0.25\text{mm}$ 이고 위 아래면의 전위차가  $100\text{V}$ 라고 한다면 발생하는 변형률은  $40\sim 80 \times 10^{-6}$ 정도가 된다. PZT의 길이를  $1\text{m}$ 라고 하여도 작동 변위는  $40\sim 80\mu\text{m}$ 가 됨을 알 수 있다. 이 정도의 변위는 무시할 수 있을 정도로 작은 값을 알 수 있으며 전지 (battery)만을 가지고 구동한다고 하면 변위는 10분의 1 수준으로 떨어지게 된다. 압전재료는 반응성이 좋기 때문에 구조물의 진동 제어와 같이 미소한 크기의 변위 제어에는 탁월한 효과를 나타내지만 큰 변위가 필요한 작동기를 만드는 데는 상당한 어려움이 있다는 것은 쉽게 짐작할 수 있다. 따라서 압전재료로 작동기를 만드는 경우 낮은 작동 전압에 대하여 큰 변위를 낼 수 있도록 하는 개념을 정립하는 것이 중요한 관건이 된다.

## 3. 압전 작동기의 연구 현황

### 3.1 압전 작동기의 개발 추세

앞에서 살펴보았듯이 단일 압전 세라믹은 큰 작동 응력

(~tons/in<sup>2</sup>)을 내지만 10<sup>-3</sup>정도의 작은 변형률을 유발한다. 그러므로 큰 작동 변위가 필요한 부분에는 적용하기 힘이 든다. 이를 보완하기 위하여 여러 가지 개념의 압전 작동기가 개발, 시험되고 있다. 본 절에서는 다양한 형태의 압전 작동기를 소개한다. 기구학적인 개념을 이용한 압전 작동기는 다음절에서 소개하였다.

3.1.1 바이모프(Bimorph) 작동기

바이모프 형태의 압전 작동기는 Fig. 2와 같이 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.

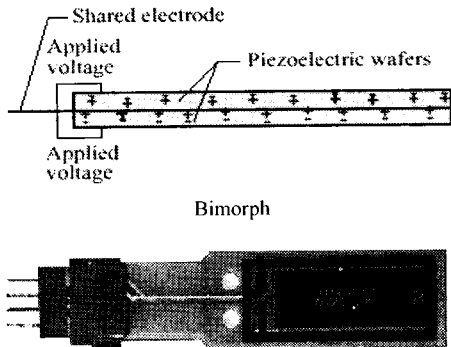


Fig. 2 바이모프형 작동기 (미국 ACX사 제품).

3.1.2 다적층 세라믹 작동기

Fig. 3은 다적층 세라믹 작동기(multilayer ceramic actuator)를 나타낸다[23]. 다적층 세라믹 작동기는 여러 개의 PZT를 배열하여 일체로 제작한 것으로 적층수 만큼 변위가 배가되므로 큰 작동력이 필요한 부분에 유용하게 사용될 수 있다. 그러나 무게가 무거워지고 소모 전기용량이 커지는 단점이 있다.

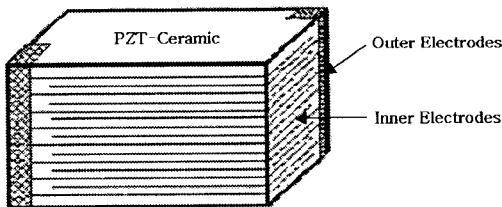


Fig. 3 다층 세라믹 작동기.

3.1.3 무니(Moonie) 작동기

Fig. 4의 moonie 작동기는 압전재료의 작은 작동 변위를 횡 방향 변위로 증폭한다[24]. 이 작동기는 'cymbals' 또는 빈 공간의 형상이 달과 같다 하여 'moonie' 작동기라고 불린다. PZT재료에 붙어 있는 금속 다리(endcap)의 재질 및 접촉시의 온도 변화에 따른 초기 응력(prestress)에 따라 다른 특성을 얻을 수 있는 장점이 있다.

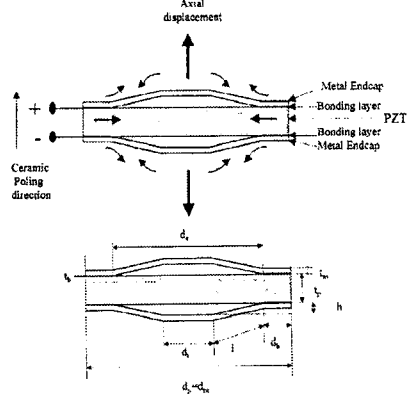


Fig. 4 Moonie 작동기 형상 및 작동원리.

3.1.4 RAINBOW 작동기

RAINBOW(Reduced And Internally Biased Oxide Wafer)는 화학적인 반응을 통하여 PZT의 한쪽 면을 환원시킨 것이다[25]. PZT를 그래파이트와 함께 넣고 975 C의 고온으로 가열하면 PZT와 그래파이트의 경계면에서 산소가 날라가 금속성의 비압전 재료층과 압전재료층이 일체의 구조를 갖게 된다. 이를 냉각시키면 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.

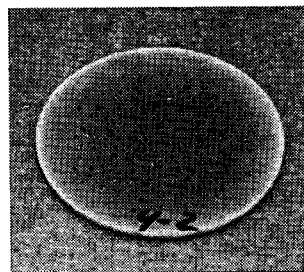


Fig. 5 Dome 형상의 RAINBOW 작동기.

3.1.5 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, Fig. 6과 같이 금속재료와 압전 박판으로 적층되어 있다.

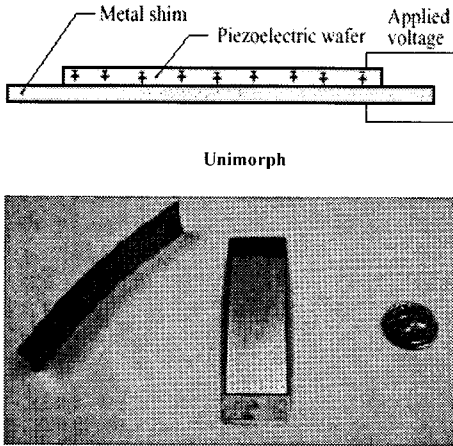


Fig. 6 THUNDER 작동기 형상.

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 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.

3.1.6 LIPCA 작동기

전국대학교 능동 구조/재료 연구실(Active Structure & Material Laboratory)에서는 Fig. 7과 같이 THUNDER의 금속층을 섬유강화 복합재료로 대체한 경량의 곡면형 작동기 LIPCA(Lightweight Piezo-composite Curved Actuator)를 개발하였다. LIPCA는 전기장에 의해 변형되는 전기작동 압전 재료층을 중심으로 탄성계수 및 열팽창계수가 서로 상반된 섬유강화 복합재료를 적층시켜 177℃로 경화시킨 후 상온으로 냉각시키면, 각 구성요소의 열팽창 계수 차이로 인하

여 그림과 같은 비대칭 곡면 형상의 작동기 구조물을 얻게 된다. 작동기의 전극을 통하여 전기장이 인가되면 세라믹 층의 변형으로 인해 작동기 중앙부에서 작동 변위가 유발된다.

LIPCA의 경우 섬유강화 프리프레그가 접착제 역할을 하기 때문에 제작 공정이 단순하다. 전체적인 작동기의 무게 측면에서 THUNDER 보다 40%이상 경량이며, 복합재료의 테일러링(tailoring)을 적절히 이용하여 원하는 형상과 구조적 성능을 가질 수 있게 할 수 있어 THUNDER 보다 효율적인 다기능 구조물에 응용될 수 있는 장점이 있다.



Fig. 7 LIPCA 작동기 형상.

3.2 기구학적 구조의 압전 작동기

기구학적인 개념을 인용하여 압전 세라믹의 작은 작동 변위로부터 큰 변위를 유발하는 것이다.

3.2.1 초음파 모터 (Traveling Wave Ultrasonic Motor)

초음파 모터 TWUM(Traveling Wave Ultrasonic Motor)은 Fig. 8과 같은 원 형태로서 압전 세라믹층과 금속재료 층으로 이루어진다.

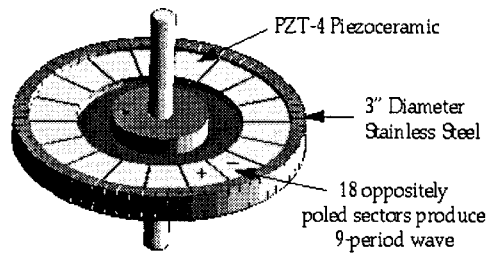


Fig. 8 Traveling Wave Ultrasonic Motor 형상.

여러 부분으로 나누어진 압전 세라믹층에 교차된 폴링과 전압위상을 다르게 주어 Fig. 9와 같이 traveling wave를 생성하고, traveling wave에 의해서 rotor와 stator의 표면에 마찰력이 발생하여 rotor가 회전하게 됨으로써 작동 변위를 유발하게 된다.

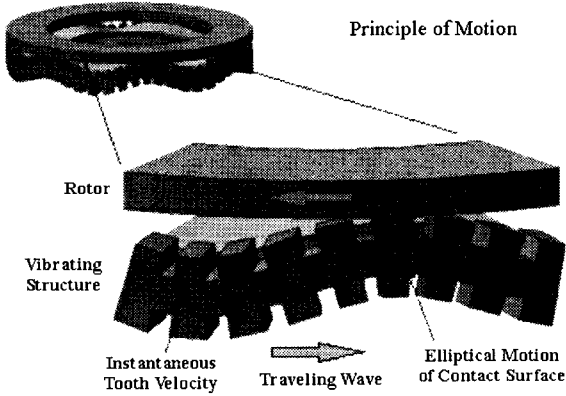


Fig. 9 Traveling Wave Ultrasonic Motor의 작동 원리.

3.2.2 압전 변압기 (Piezoelectric Ceramic Transformer)

압전 변압기(piezoelectric ceramic transformer)는 외부에서 공진 주파수의 전기적 에너지를 인가하면 압전 현상의 역 효과에 의해 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환시킨 후 그 변환된 기계적 에너지를 압전 현상의 정 효과에 의해 다시 전기적 에너지로 변화시키는 장치이다.

압전 변압기는 1957년 미국 General Electric사의 Rosen, Berkum, Katz 등에 의해 이론적, 실용적인 연구가 시작되었다. 압전 변압기는 권선 변압기에 비해 구조가 간단하고, 소형이며, 전기적 손실이 적을 뿐만 아니라 누설자속에 의한 영향이 없고 효율이 높다는 장점을 가지고 있다. 또한 출력이 고전압 소 전류이므로 그 특성을 고려하여 음이온 발생기, 전자복사기, 고주파 변압기 등의 분야에 응용되고 있으며, 최근에는 DC-DC converter, LCD 디스플레이 등에 사용되는 초고주파 압전 변압기에 사용되고 있다.

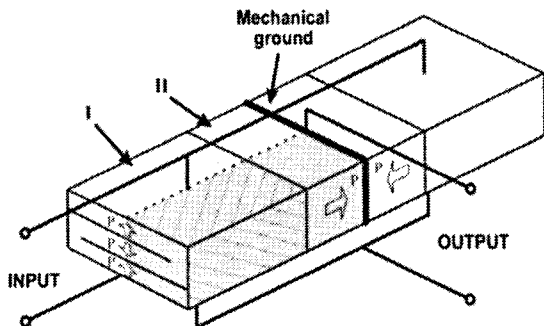


Fig. 10 Piezoelectric Ceramic Transformer 개념도.

그밖에도 사진기의 초점 거리를 바꾸는데 많이 쓰이는 인치웸 모터를 사용한 작동기와 같은 메조스케일 작동기 등이 있다. 인치웸 모터는 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 30mm 정도 크기의 압전 작동기의 경우 0.035-4.5kgf를 내는 것으로 알려져 있다. 이를 MAD 작동기(Mesoscale Actuator Device)[26]라고 부른다.

4. 압전재료 작동기의 응용 현황

4.1 항공우주분야

압전재료를 응용한 적층형 압전 복합재료 작동기는 세라믹의 특성상 커다란 항공우주 구조물보다는 소형 무인항공기나 소형 미사일의 자세 제어용 작동기에 적합하다. 또한 헬리콥터의 블레이드 팁 부분에 장착되어 블레이드의 제어 구조 시스템의 단순화 및 블레이드 팁에서 발생하는 소음을 줄일 수 있는 가능성을 보유하고 있다. 미국 Auburn 대학의 Barrett 교수팀이 개발한 15cm이하의 회전익형 초소형 비행체는 바이모프형 압전복합재료 작동기가 4개의 자세제어 핀의 각도 조절용으로 응용되어 구조의 단순화와 경량화 효과에 성공한 대표적 예이다. Fig. 11은 미국 Kentucky 공과대학에서 UAV(Unmanned Aerial Vehicle) 및 MAV(Micro Aerial Vehicle)의 조종면 제어를 위해 압전 재료를 적용시킨 것이다[27].

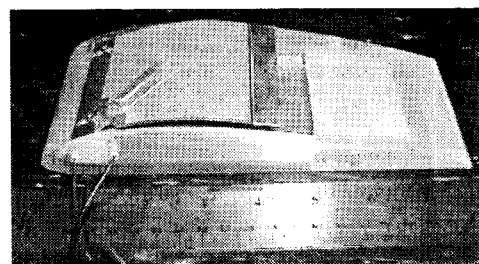


Fig. 11 압전 작동기를 적용한 Wing Module.

날개 모형에 사용된 압전 작동기는 THUNDER 7R로써 작동 전압은 -300V~+600V이다. Fig. 12와 같이 압전 작동기가 익형의 표면형상을 변화시켜 박리점을 이동시킴으로써 양항비(L/D)를 개선할 수 있다.

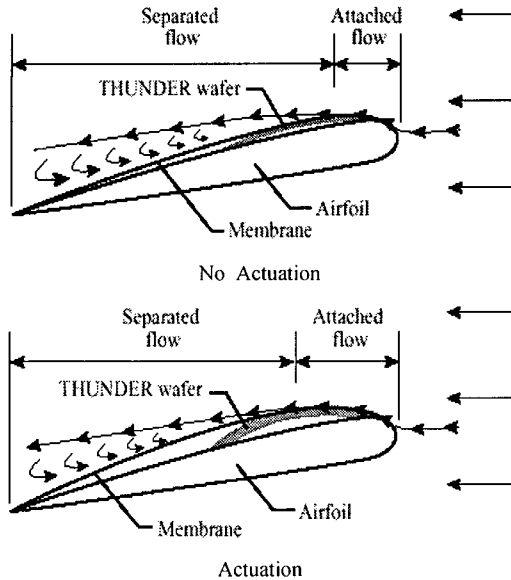


Fig. 12 THUNDER 작동기를 이용한 가변 익형 개념도.

Fig. 13은 제작된 날개 모형을 레이놀즈수= $2.5 \times 10^4$ , 받음각= $9^\circ$ 인 상태에서 작동기를 45Hz로 작동시켰을 경우 박리점 변화를 알아보기 위한 풍동 시험으로서, 박리점은 익형의 끝단 부분으로 이동되어 양항비(L/D)가 개선되었다.

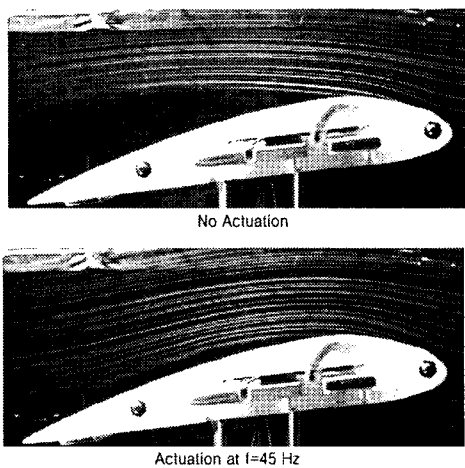


Fig. 13 Wing Module을  $f = 45\text{Hz}$ 로 작동시킨 형상.

Fig. 14는 미국 Texas Alington 대학에서 연구되고 있는

곡면형 압전 복합재료 작동기를 이용한 미사일 조종편 구조 개념도로 미사일의 경량화와 명중률을 향상시키려고 하는 연구가 진행중이다.

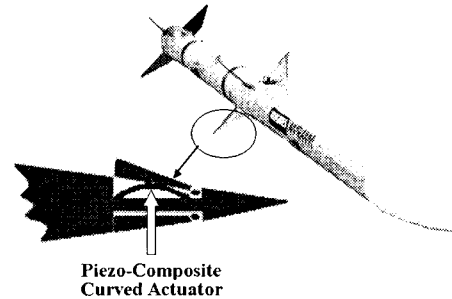


Fig. 14 곡면형 압전복합재료 작동기를 응용한 미사일 조종편 구조 개념도.

Fig. 15는 압전재료 작동기를 응용한 인공위성의 태양전지판의 진동 억제를 위한 구조 개념도를 나타내고 있다. 인공위성 구조물은 음지와 양지가 바뀔때 따라 급격한 온도변화를 받게되고 열변형 및 Thermal Snap 현상 등에 의하여 구조물 진동이 일정시간 지속되는 지터링(jittering)현상이 일어나 통신장애나 구조물의 불안정 현상을 야기한다. 미국의 군사 위성은 압전재료를 이용한 능동진동억제 방법을 적용하여 지터링 현상을 억제함으로써 인공위성의 성능향상을 도모하고 있는 것으로 알려져 있다.

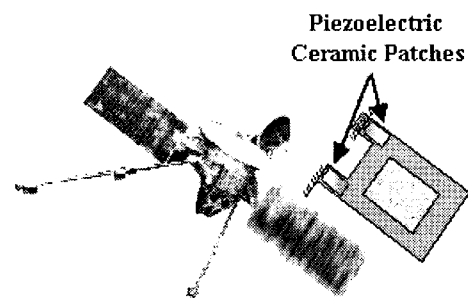


Fig. 15 곡면형 압전복합재료 작동기를 응용한 미사일 조종편 구조 개념도.

미국 MIT 공과대학의 Hagwood 교수팀이 이끌고 있는 Active Materials & Structures Lab.에서는 지능재료를 이용한 Micro UAV(Unmanned Air Vehicle), Active Rotor Blade Control, Acoustic Control, Mars Micro Lander Manipulator 등에 대하여 활발하게 진행하고 있다. Fig. 16은 압전 세라믹

섬유 복합재료를 테일러링한 헬리콥터 블레이드의 비틀림 제어 구조 형상이다.

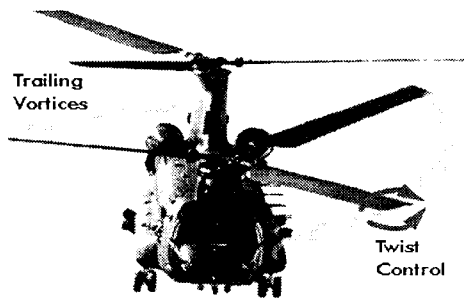


Fig. 16 헬리콥터 블레이드의 형상변화 개념.

Fig. 17은 CH-47D 치누크 헬리콥터의 블레이드를 1/16로 축소시켜 블레이드 스파에 능동 섬유 복합재료(active fiber composite)를 부착시킴으로써 블레이드는  $\pm 2^\circ$ 의 끝단 비틀림 각도를 가지게 된다. 전기장이 압전 재료에 인가되어 블레이드의 형상을 변화시킴으로써 회전시 끝단 와류에서 발생하는 진동 및 소음을 감소 시켰으며, 블레이드에 형성된 비틀림에 의해 공력특성이 향상되어 비행 성능 개선을 기대할 수 있다.

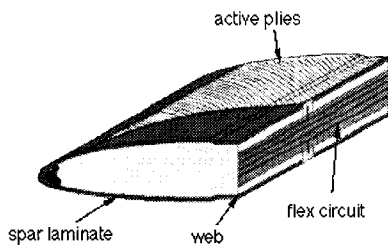


Fig. 17 Active Composite Fiber를 적용한 Blade 형상.

4.2 기타 분야

미국 해군연구소(ONR)는 잠수함의 외벽에 압전재료를 이용한 스마트스킨(smart skin)을 부착하여 잠수함의 소음과 진동이 바다 물로 전파되지 못하도록 하는 스텔스 기능의 스마트 구조물을 개발하고 있는 것으로 알려지고 있으며, 그 외에 Fig. 19-22와 같이 unimorph형 THUNDER 작동기를 응용한 flapping, mobile robot 형태가 있다.

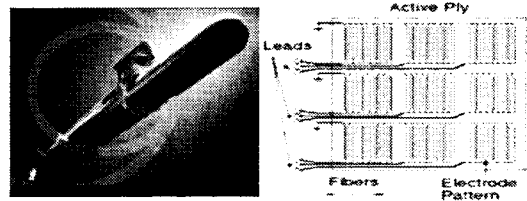


Fig. 18 Active Composite Fiber 형상.

Fig. 19와 20은 미국 Vanderbilt 대학에서 THUNDER 작동기를 Mesoscale Robotic Insect에 적용시킨 것이다. 구조가 간단하면서 경량인 THUNDER 작동기를 플래핑(flapping)형태의 구조물에 적용시킴으로써 Mesoscale Flying Insect의 가능성을 확인할 수 있다.

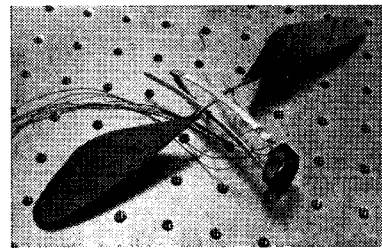


Fig. 19 Mesoscale Flying Insect 형상 (1).

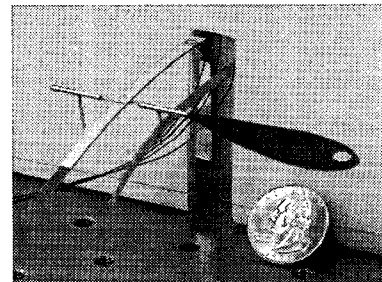


Fig. 20 Mesoscale Flying Insect 형상 (2).

Fig. 21과 22 같은 Mesoscale Mobile Robot의 경우는 2개의 THUNDER 7R작동기의 수직방향 변위를 기구학적으로 이용한 것이다. Fig. 21의 Mobile Robot의 무게는 50g이며, 작동전압은 AC  $\pm 240V$ 에서 작동하고, 최고 속도는 300mm/sec이다. 이때의 작동 주파수는 32Hz이며, 1400mW의 전력이 사용된다.

이와 같은 Mesoscale Robot은 항공우주뿐만 아니라 다양한 분야에 걸쳐 연구되고 있다.

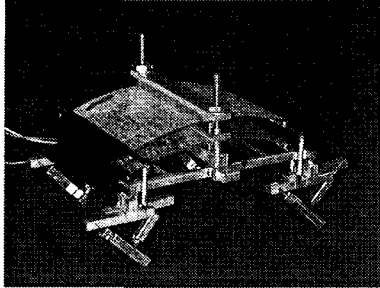


Fig. 21 Mesoscale Mobile Robot 형상 (1).

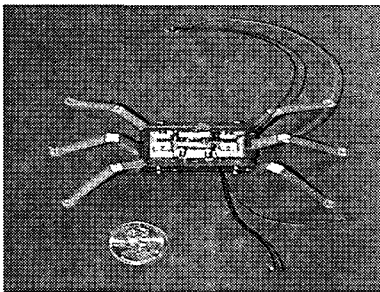


Fig. 22 Mesoscale Mobile Robot 형상 (2).

## 5. 결 론

미국의 DARPA(Defense Advanced Research Projects Agency)에서는 1999년부터 3년간 3500만불의 연구비를 투입하며 현재 보다 10배 이상의 성능을 가지는 작동기의 개발을 CHAP(Compact Hybrid Actuation Program)으로 지원하고 있다. 여기에서 10배의 성능이라는 요구조건은 현재의 작동재료나 작동기 구조의 개념이 혁신적으로 개선되어야 한다는 의미로 작동기 기술 분야에서 break through의 필요성을 강조하고 있다. 이러한 작동기는 전통적인 방법으로는 불가능한 것으로 발상의 전환을 통하여 새로운 개념의 작동기가 출현되어야 가능할 것으로 생각된다.

경량이면서 작동 변위와 작동력이 매우 큰 폴리머 재료로 구성된 동물 근육 모방 인공근육 작동기가 이러한 범주에 들어갈 것이다. 작동력과 작동 변위가 충분한 인공근육형 작동기가 개발되면 무게가 가벼워지고 구조를 단순하게 할 수 있는 장점이 있어 기존의 회전 모터나 유압식 작동기를 대체하여 항공기나 미사일 조종면 날개 작동 시스템과 로봇의 작동 시스템 등에서 혁신적인 변화를 가져올 것이다.

## 참고문헌

- 1) G.H. Haertling, "Rainbow Actuator and Sensors: A New smart Technology," *Proc. of SPIE Conference*, San Diego, CA, 3-4 March, Vol. 3040, 1997, pp.81-92.
- 2) K.M. Mossi and R.P. Bishop. "Characterization of Different types of High Performance THUNDER Actuator," *Proc. of SPIE Conference*, Newport Beach, CA 1-5 March, Vol. 3675-05. 1999.
- 3) Hellbaum, R., Bryant, R.G., and Fox, R.L. "Thin Layer Composite Unimorph Ferroelectric Driver and Sensor." United States Patent No. 5, 1997, 632, 841.
- 4) K.J. Yoon, Seokjun Shin, H.C. Park and N.S. Goo "Design and manufacture of a lightweight piezo-composite curved actuator," *Smart Materials and Structures*, Vol. 10. 2001. 1-6 (in print).
- 5) N.S. Goo, C. Kim, Y.D. Kwon and K.J. Yoon, "Behaviors and Performance Evaluation and Optimal Design of Lightweight Piezo-composite Curved Actuator," *Journal of Intelligent Material System and Structures* (in print).
- 6) Bailey, T. and Hubbard Jr, J.E., "Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam," *Journal of Guidance and Dynamics*, Vol. 8, No. 5, 1985, pp. 605-611.
- 7) 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.
- 8) Scott, R.C. and Weisshaar, T.A., "Controlling Panel Flutter using Adaptive Materials," *AIAA-91-1067-CP*, 1991, pp. 2218-2229.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) Chandra, R. and Chopra, "Structural Modeling of Composite Beams with Induced-Strain Actuator," *AIAA Journal*, Vol. 31, No. 9, 1993, pp. 1692-1701.
- 12) Kim, J.W. and Varadan, V.V. and Varadan V.K., "Finite Element Modeling of Structures Including Piezoelectric Active Devices," *International Journal for Numerical*



- Methods in Engineering*, Vol. 40, 1997, pp. 817-832.
- 13) Bent, A.A. and Hagoood, N.W., "Piezoelectric Fiber Composites with Interdigitated Electrodes," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 8, 1997, pp. 903-919.
  - 14) Benjeddou, A., "Advances in Piezoelectric Finite Element Modeling of Adaptive Structural Elements: A survey," *Computers and Structures*, Vol. 76, 2000, pp. 347-363.
  - 15) 황우석, 박현철, "유연보의 진동 제어를 위한 압전 감지기/작동기 설계," *한국항공우주학회지*, 제 21권, 2호, pp. 26-36, 1993.
  - 16) 김승한, 최승복, 정재천, "압전필름을 이용한 외팔보의 능동진동제어," *한국항공우주학회지*, 제 21권, 5호, pp. 76-87, 1993.
  - 17) 한재홍, 이인, "유한요소법을 이용한 지능 복합재 구조의 진동 제어 특성 고찰," *한국항공우주학회지*, 제 23권, 1호, pp. 85-96, 1995.
  - 18) 유정열, 강우영, 김승조, "이방성 압전재료를 이용한 복합재료 평판의 진동 제어에 관한 연구," *한국복합재료학회지*, 제 9권, 1호, 1996, pp. 17-26.
  - 19) 류치영, 박중완, 윤광준, "광섬유센서를 이용한 복합적층판의 모재균열 검출," *한국복합재료학회지*, 제 9권, 1호, 1996, pp. 27-40.
  - 20) 라완규, 관분규, 윤광준, "압전 감지기와 작동기를 이용한 복합재료 격자 구조물의 능동 진동 제어," *한국항공우주학회지*, 제 25권, 5호, 1997, pp. 76-85.
  - 21) 유정규, 박근영, 김승조, "복합재 적층판의 진동 제어를 위한 분포형 압전 감지기/작동기 설계 최적화," *한국복합재료학회지*, 제 10권, 3호, 1997, pp. 98-108.
  - 22) 김호기, 신병철, *압전 전왜 세라믹스-원리와 응용 실험*, 반도출판사, 1996.
  - 23) Wise, S.A. and Hooker, M.W., "Characterization of Multilayer Piezoelectric Actuator for Use in Active Isolation Mounts," Langley Research Center, Hampton Virginia, Science and Technology Corporation, Mar. 1997.
  - 24) Fernandez, J.F., Dogan, A., Fielding, J.T., Uchino, K. and Nevnham, "Tailoring the Performance of Ceramic-Metal Piezocomposite Actuator, 'Cymbals'," *Sensors and Actuators*, Vol. 65, 1998, pp. 228-237.
  - 25) Haerlting, G.H., "Rainbow Ceramic: A New Type of Ultra-High-Displacement-Actuator," *American Ceramic Society Bulletin*, Vol. 73, 1994, pp. 93-96.
  - 26) 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.
  - 27) David Munday, and Jamey Jacob, "Active Control of Separation on a Wing with Conformal Camber," *AIAA Journal* 2001-0293.
  - 28) K.J. Yoon, S. Shin, H.C. Park, and N.S. Goo, "Development of Lightweight Piezocomposite Curved Actuator," *Submitted to AIAA Journal*.
  - 29) Carotenuto, R., Lamberti, and 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.
  - 30) L.D. Jones, D.V. Newton, and E. Garcia, "Adaptive device for precise position control," *Proc. of the International Society for Optical Engineering (SPIE)* 1917 (1993) 648-659.1.