

## 特輯

## 압전 재료의 응용에 대한 연구 및 개발 동향

### Research and Development Trends on Application of Piezoelectric Materials

이 인

한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공, 한국복합재료학회 부회장

## ABSTRACT

In this survey paper, the application research and development trends of piezoelectric materials are reviewed. Advantages and disadvantages of piezoelectric materials, and the recent research to overcome the drawbacks are discussed. The market of piezoelectric sensors and actuators in USA, Japan, and EU is surveyed with several examples. In Korea, the analytical research concerning piezoelectric materials is active but the developments of devices and equipments are not so active, and the investment in this field is necessary.

## 초 록

본 논문에서는 압전재료를 이용한 연구 및 개발의 최근 동향에 대해서 살펴보았다. 압전 재료의 장·단점을 개괄하여 살펴보고, 압전 재료의 단점을 극복하기 위한 기반 기술에 대해 살펴보았다. 압전 재료와 관련된 시장규모와 감지기와 작동기 등으로 주로 응용되는 압전 재료의 미국, 일본, 유럽의 연구 및 개발에 대한 최근 동향을 사례별로 고찰하였다. 국내에서는 압전 재료의 응용에 관련된 해석적 연구는 활발히 이루어지고 있으나, 압전 재료 소자나 장비 개발은 취약하여 이에 대한 투자가 필요하다.

## 1. 서 론

1980년대 초반 이래로 지능 구조물(smart structure)이란 분야가 발전하였다. 지능 구조물은 기계 구조물이 생명체와 같이 외부의 환경 변화를 감지하고 이에 적절히 반응하여 구조물의 안정성 및 신뢰성을 확보하려는 요구에서 파생된 개념이다[1-2]. Gandhi 등[3]은 지금까지의 인류의 역사를 석기, 청동기, 철기, 기능성(functional) 재료 시대를 거쳐 바야흐로 지능 재료(smart material) 시대가 도래하고 있다고 주장하였고, 구조물과 감지기(sensor), 작동기(actuator)가 종합되는 구조를 지능 구조물로 정의하였다.

인간의 근육과 비슷하게 성능이 우수한 작동기를 개발하는 것은 인류의 오랜 희망이었다. 그동안 전자기적인 힘을 이용한 모터, 액체나 기체 분자간의 압력차를 이용한 유공압 장치, 고체 격자내의 원자간의 힘을 이용한 압전 재료 등이 작동기로서 널리 이용되어 왔다. 여러 형태의 작동기들의 특성을 비교한 결과에 의하면, 압전 작동기는 단위

면적당 발생력이 우수하고, 정밀도와 반응 속도가 특히 뛰어난 점을 알 수 있다[4].

지능구조물에 대한 관심이 고조됨에 따라 여러 가지 기능성 재료들을 이용하여 구조물의 성능을 향상시키고자 하는 연구들이 활발히 이루어지고 있는데, 대표적으로 압전(piezoelectric) 재료, 전왜(electrostrictive) 재료, 자기왜(magneto-strictive) 재료, 유전 유체(electro-rheological fluid), 자성 유체(magneto-rheological fluid), 형상기억합금(shape memory alloys), 광섬유(optical fiber) 등이 있다. 이러한 작동기로 사용되는 기능성 재료들의 성능을 비교하면 압전 작동기의 작동력이 우수한 편이고, 작동 속도와 강성도 뛰어난 것으로 알려져 있다[2]. 그러나 이렇게 여러 면에서 우수한 압전 재료가 지능 구조물에 널리 쓰이게 될 때까지 많은 난관들이 극복되어야만 했었다.

본 논문에서는 압전 재료의 장단점 및 단점을 극복하기 위한 기반 기술, 압전 재료와 관련된 시장규모, 감지기와 작동기로서의 연구 및 개발 동향 등에 대해서 살펴보겠다.

## 2. 압전 재료의 특성 및 개선

1880년 Pierre Curie와 Jacques Curie 형제에 의해 로셴 소금(Rochelle salt)에서 처음으로 발견된 압전성(piezoelectricity)이란 단어는 압력(piezo)과 전기(electricity)란 그리스어에서 합성되었다.

미시적 관점에서 보면, 압전 현상은 결정 구조의 이온(ion) 변형에 기인한다. 외부 응력이 가해지지 않은 상태에서는 압전 재료 내의 전하 분포가 대칭적이고 전기적으로 중성이지만, 외부 응력이 가해지면 전하의 분포가 비대칭적이 되고, 이러한 전기적인 극화(polarization)가 전압으로 관찰되는데, 이러한 성질을 갖는 결정구조를 페로브스카이트(perovskite) 구조라고 한다.

자연 상태의 압전 재료는 그 효과가 크지 않았기 때문에 압전 현상이 발견된 지 백여년이 지난 후에 압전 효과가 큰 재료가 인공적으로 합성된 후에서야 공학적인 응용이 가능해졌고, 압전 재료에 대한 연구가 활발히 수행되었다. 해석적인 측면에서 유한요소 해석 상용 패키지들을 이용해서도 압전 재료의 해석이 가능 하지만 적용 분야가 다양하지 못하며, 이러한 압전 재료의 유한요소 해석에 관한 연구는 해마다 꾸준히 증가하였으며[5], 미국 특허청의 키워드 검색 결과를 살펴보면, 해마다 압전 재료에 관련된 미국 특허가 꾸준히 증가함을 알 수 있다.

### 2.1 압전 재료의 장점과 응용

우선 압전 재료의 장점들과 각 장점들을 어떻게 응용하는지 살펴보면 다음과 같다.

#### a. 에너지 변환 효율 높음

에너지 변환 효율이 높은 장점을 살려 압전 변압기가 개발되었다.

#### b. 적은 부피로 큰 힘 발생

압전 작동기는 다른 작동기들에 비해 같은 부피로 큰 힘을 발생시킬 수 있으므로 제품을 작게 만들어야 하는 항공, 우주, 군사, 스포츠 분야에서 응용되고 있다.

#### c. 높은 주파수에서 작동 가능(~100 MHz)

주로 무선 통신용으로 사용되는 SAW(Surface Acoustic Wave) 필터 등에 사용된다.

#### d. 높은 정밀도 (~1 $\mu$ m)

초정밀 위치 제어와 관련된 원자현미경, 광학장치, 정밀

결삭 장치 등에 사용된다.

#### e. 마찰이나 마모가 없어 수명이 반영구적

초음파 진동자로 사용되어 유량 측정기, 초음파 진단기 등으로 사용되고 있다.

#### f. 자기장의 영향을 받지 않음

초음파 진동기는 자기장의 영향을 받지 않으므로 자기장이 강해 일반 모터를 쓰기 힘든 핵자기공명장치(MRI)에 들어가는 작동기로도 사용된다.

### 2.2 압전 재료의 단점과 극복

압전 재료의 단점과 이를 보완 및 극복하기 위한 기반 기술들을 살펴보면 다음과 같다.

#### a. 대변형을 발생시키기 힘들다.

대변형을 발생시키기 위해 압전 재료를 여러 겹으로 쌓아서 만든 적층형 압전소자 (piezo -electric stack)를 사용하거나 지렛대의 원리를 이용한 변위 확대 기구를 사용하거나 대변형이 가능한 모터와 같이 사용하는 경우가 많다. 적층형 압전 작동기에 좁은 달 모양의 공동을 갖는 두 개의 금속 엔드캡을 접착시킨 무니(moonie), 굴곡진 무니(grooved moonie), 심벌(cymbal)이란 변위 확대 기구를 사용하면, 일반 압전 작동기보다 2 배 정도 많은 변위를 발생시킬 수 있고, 엔드캡의 모양을 적절히 변화시키면 다시 변위를 2 배정도 더 높일 수 있다고 보고 되었다[6].

Fig. 1은 X-frame을 두 개 사용하여 15:1로 변위를 두 번 확대시킨 작동기로서 헬기의 로터블레이드를 제어하기 위해 고안되었다.

최근에 NASA에서는 THUNDER<sup>TM</sup>라고 불리는 셀 모양의 대변형 압전 작동기를 개발하였다[7]. THUNDER<sup>TM</sup>는 금속층, LaRC-SI, PZT, LaRC-SI과 알루미늄으로 구성된 복합적층 원통형 패널 형태를 가지고, 작고 경제적이며 임의의 곡률과 형상으로 제작이 가능하고 작동기의 두께도 1 mm 이내로 만들 수 있다. 작동 주파수 영역은 0 ~ 10 kHz 범위에 이르며, 강도와 내구성이 뛰어난 것으로 알려져 있다. THUNDER<sup>TM</sup>는 원통형의 셀의 소음 및 진동제어 뿐만 아니라 초소형 비행체(MAV)의 양력발생장치로의 적용이 연구되고 있다.

#### b. 깨지기 쉽다.

MIT Active Materials & Structures 실험실에서는 Fig. 2와 같이 압전 섬유를 작동기로 사용하여 압전 세라믹의 깨지

거나 부러지기 쉬운 단점을 극복하였고, 교차패턴화된 (interdigitated) 전극을 사용함으로써 같은 전압 하에 작동력을 2배 이상 향상 시켰다. 또한 유럽에서도 이와 유사한 압전 섬유 작동기에 대한 연구가 활발하다[8].

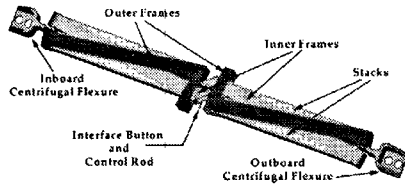


Fig. 1 Double-X actuator using for displacement magnification.

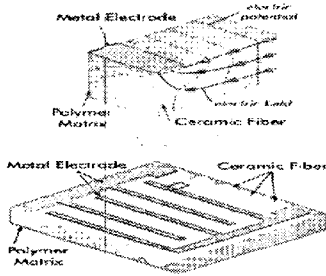


Fig. 2 Active piezoelectric fiber with interdigitated electrodes.

c. 고전압을 가해야 한다.

압전 재료에 가해지는 고전압을 위해서 그동안 고가의 고전압 증폭기를 사용하여 왔으나, 미국의 APEX 사에서는 집적화된 고전압 증폭기를 상업화 하여 압전 재료에 고전압을 손쉽게 가할 수 있게 되었다[9]. 또한 같은 전압에 대해서 작동력을 향상시키기 위해서 위에서 언급한 교차패턴화된 전극을 사용하기도 한다.

d. 큐리 온도 이상이 되면 압전성을 잃는다.

큐리 온도 이상이 되면 압전 재료는 극성을 잃게 되므로, 압전 성질도 잃게 되어 압전 재료를 고온에서 사용하기 힘들었다. 그러나, 압전 재료에 들어가는 원소들의 조성 비율을 조정하여 큐리 온도를 350°C 정도까지 높은 제품이 Fuji Ceramics 등을 통해서 상용화 되었다.

e. 히스테리시스(hysteresis)가 있다.

압전 재료는 작은 히스테리시스(히스테리시스)가 있으나, 되먹임 제어를 통해 압전 재료의 비선형성을 보상할 수 있다[9].

f. 크리핑(creeping)이 있다.

시간에 따라서 압전 재료의 변위가 서서히 변하는 현상으로, 보통의 경우 이 값은 작아서 무시할 정도이지만 정밀한 위치제어를 위해서는 크리핑 현상이 나타나지 않는 전왜(electrostrictive) 재료를 사용하기도 한다.

g. 저주파 감지 특성이 나쁘다.

일반적으로 압전 감지기는 저주파 영역(0~1Hz)에서 외부로부터 변형률이 가해지면 전하(charge)가 발생하지만, 측정을 위해 이 전하를 빼내면 전하가 다시 발생할 때까지 변형률을 감지하기 힘들기 때문에 저주파 감지 특성이 나쁜 것으로 알려져 있다. 그러나, 압전 감지기를 전하 증폭기(charge amp.)에 연결하여 사용하면 신호의 크기도 증폭할 수 있고 미소량의 전하만 측정용으로 사용하기 때문에 저주파 영역에서의 왜곡이 덜하다[10-11].

지금까지 압전 재료의 단점과 이를 극복하려는 기반 기술들에 대해 살펴보았다. 이 외에도 압전 재료를 적용하여 지능 구조물을 현실화하기 위해 필요한 기술들을 열거하면 다음과 같다. 1) 압전 재료를 구조물에 부착/삽입하는 통합 시스템 제작기술. 2) 우수한 특성을 갖는 압전 재료 개발을 위한 재료공학 기술. 3) 초정밀 시스템에 적용하기 위한 미세 가공기술.

### 3. 압전 재료의 응용에 대한 연구 동향

#### 3.1 압전 재료 응용 기기들의 시장 동향

압전 재료가 본격적으로 상업화된 지 20 여 년이 흘렀고, 압전 재료를 이용한 부품들은 프린터 헤드나 통신용 SAW 필터의 경우처럼 흔히 볼 수 있게 되었다. 이는 압전 성이 큰 PZT(lead zirconate titanate)와 PVDF(polyvinylidene fluoride)의 인공적인 합성에 기인한다.

미국에서는 약 10여년 전부터 DARPA(Defence Advanced Research Project Agency)를 통해 대학 및 전문 연구기관에서 스마트 구조 기술 개발에 연간 5 천만 달러 이상을 투자해오고 있고, 30 cm 이상의 비교적 대형 작동기를 사용한 군사용 능동 진동제어에 연구 및 개발의 초점이 맞추어져 있다. 미해군은 지능형 잠수함 스킨(smart submarine

skins), 하이드로폰 (hydrophone), 프로펠러 소음 제어 등을 연구하고, 미공군은 지능형 비행기 스킨(smart aircraft skins), 미육군은 헬기 로터 블레이드용 작동기, 플러터 제어, 비행기 실내 소음/진동 제어 등을 연구하고 있다. 또한, 최근(1991-1996)에 NASA와 MIT가 공동으로 PARTI (Piezoelectric Aeroelastic Response Tailoring Investigation) 프로그램을 추진하였고, 목적은 플러터 억제를 통한 비행 영역(flight envelope) 확장, 동적 안정성 증대 및 시스템의 교란 억제 기능의 향상과 구조의 피로 파괴를 억제하고 비행체의 기동 성능을 향상시키면서 조종 날개의 과도 응력을 완화시키는 것이다. 연구 대상 모델로는 NASA와 Rockwell이 주도한 AFW(Active Flexible Wing)와 2차원 익형 모델인 BACT (Bechmark Active Conrols Technology)가 있다.

일본은 주로 민간업체에서 1cm 이하의 초소형 압전 작동기와 초음파 모터를 개발해 오고 있으며, 정밀 위치 제어에 관련된 응용에 중점을 두고 있다. 유럽은 정부 주도로 실험 장비를 만드는 단계이고, 미국과 일본의 중간 크기를 갖는 작동기에 연구 초점이 맞춰져 있다. 정밀 위치 제어 관련 장비들의 수입액은 최소 연 350 억원으로 추정되고[12], 미국의 ACX사에 의하면 압전 재료를 비롯한 지능형 재료에 대한 수요는 연 2 억 달러에 이르고 있다고 추정된다. 이러한 각국의 연구 및 개발 동향을 정리하면 Table 1과 같다[6].

선진국에서 25 여 년 전부터 압전 재료에 대한 연구가 시작되어 현재는 활발한 제품 생산 단계에 들어섰으나, 국내에서는 압전 재료가 부착 혹은 삽입된 복합재료 설계와 성형, 최적화에 대한 연구는 많이 되어 있으나, 압전 필름 및 압전 세라믹 및 이들을 응용한 제품들의 생산이나 상용화 및 실제 구조물에의 적용에 대한 연구는 미진한 상태이다.

### 3.2 압전 재료를 이용한 감지기 및 작동기

압전 재료를 이용한 감지기는 가속도계, 변형률 센서, 교통신호 센서, 유량계, 충격센서, 진동센서, 자이로스코프 등 매우 다양하다.

저항형 압전소자(piezoresistor)를 이용한 초소형 압력 센서는 1950년대 후반부터 Kulite, Honeywell, MicroSystems 등의 회사에서 생산하기 시작했다. 최근에는 특수한 목적을 위한 센서를 개발하기 위해 MEMS 기술을 도입하여 초소형 압력 센서를 개발하는 연구들이 진행되고 있다 [13,14].

여기에 사용된 저항형 압전소자는 응력과 온도에 따라 저항 값이 변하기 때문에 압력이나 가속도를 감지할 때 핵

심 부분으로서 작동한다. MEMS 기반 압전 센서는 Royer 등이 처음으로 구현하였다[15]. 압력 하중에 의해 발생하는 진동판의 변형은 4개의 저항형 압전소자를 이용하여 Wheatstone bridge 형태로 구성되어 압력에 민감하면서도 온도 변화에 둔감한 측정값을 얻을 수 있다[13].

Table 1 Research and development trend of piezoelectric actuator[6].

	US	Japan	Europe
Target	Military	Mass consumer product	Lab. equipment
Category	Vibration suppressor	Micro motor, Positioner	Vibration suppressor, Micro motor, Positioner
Applli-cation field	Space structure, Military vehicle	Office equipment, Camera, Precision machine, Automobile	Lab. stage/stepper, Airplane, automobile, Hydraulic system
Actuator size	Up-sizing (30cm)	Down-sizing (1cm)	Intermediate size (10cm)
Major manufacturer	AVX /Kyocera, Morgan Matroc Itek Opt. Sys. Burleigh AlliedSignal	Tokin NEC Hitachi metal Mitsui chemical Canon Seiko Instr.	Philips, Siemens Hoechst CeramTec Ferroperm PI

현재 PVDF 등의 압전 폴리머 감지기는 대부분 박막 형태로 제조된다. 구조물의 표면에 부착되어 사용해야 하는 단점이 있는데, 압전 케이블(Piezo polymer coaxial cable)은 동축케이블 형태로 설계되어 중심부와 바깥쪽 구리 실드(shield) 사이에 유전성이 있어 케이블이 압축되거나 당겨질 경우 응력에 비례하여 전하가 발생된다. Fig. 3은 Measurement Specialties, Inc.(MSI)에서 생산하는 케이블 형태의 압전 폴리머이다. 이와 같은 케이블은 자체적으로 실드되어 있어 강한 전자기 간섭(EMI) 환경에서도 사용이 가능하다. 또한 여러 가닥을 꼬아서 보다 큰 케이블로도 제작이 가능하다. 이러한 장점들을 이용하면 대형 구조물에도 적용이 가능할 것이다.

또 다른 흥미로운 압전 센서로 교통 센서(traffic sensor)를 들 수 있다. 교통 센서는 도로에 설치되어 교통량을 측정할 수 있다. Fig. 4는 교통 센서가 도로에 설치된 그림이다. 교통 센서는 도로에 유연하게 설치되어 도로와 같이 변형을 일으키고, 편평한 감지부는 도로의 힘, 인접 차선, 다가오는 차에 의한 bow wave 등으로 인한 잡음을 배제시킬 수 있고, 이러한 센서로 도로에 작용하는 중량, 차량 통과 대수, 차량 속도 등을 감지할 수 있다.

이외에도 압전 감지기는 자이로스코프[16,17], 초소형 충

격센서, 초음파 관련 측정장비, 음향 방출(acoustic emission) 센서 등 무수히 많은 분야에 응용되고 있다.

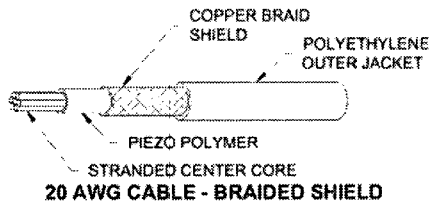
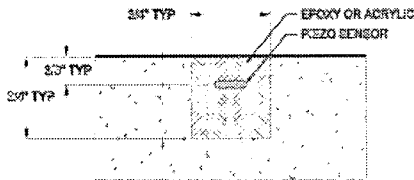


Fig. 3 Piezo Polymer Coaxial Cable.



Permanent In-The-Road Installation

Fig. 4 Traffic sensor.

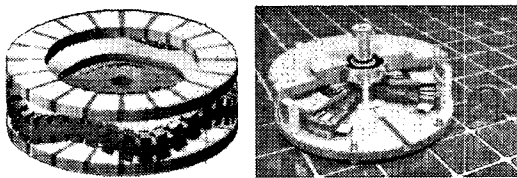


Fig. 5 Ultrasonic motor(AMSL, MIT).

압전 재료를 이용한 작동기 또한 다양한 분야에서 연구 개발이 이루어 졌다. 단순한 판형의 PZT 외에 대표적인 작동기로 초음파 전동기(ultrasonic motor)를 들 수 있다. 초음파 전동기관 Fig. 5와 같이 초음파 대역의 탄성파(압전 재료에 의한 기계적 진동)를 구동원으로 하는 작동기로서 압전 세라믹에 전압이 가해져 1 mm 정도의 신축을 반복하면 왼쪽 그림과 같이 탄성파가 발생하고 이 탄성파가 위 판의 회전자를 회전하게 만든다. 일반적으로 초음파 전동기의 장점은 저속에서는 토크와 효율이 높은 편이고, 단위 부피당 발휘할 수 있는 토크가 크며, 회전자의 관성이 작아 기동 및 정지 등의 제어 특성이 좋다. 또한, 토크가 크므로 치차 등의 감속장치가 필요 없어 가볍고, 조용하게 정밀한

위치 제어가 가능하다. 자기장을 이용하지 않으므로 전자 유도에 의한 간섭 장애의 염려가 없어 강한 자기장이 사용되는 MRI 장비에도 쓰인다[4]. 그러나, 부하가 증가함에 따라 회전 속도가 감소하고, 고주파 구동용 전원이 필요하다. 탄성파에 의해 마찰이 일어나므로 내 마모재가 필요하고 자체적으로 열이 발생하여 고온 환경에서 사용하기 힘들다. 탄성파의 진동 모드를 사용하므로 수 kW 이상의 동력(power) 발휘에 한계가 있다[18-21].

이외에도 의료용 초음파 장비, 바이모프(bimorph) 보(beam)를 이용한 압전 팬, 압전 펌프, 카메라에 사용되는 압전 셔터, VTR 헤드의 트래킹(tracking) 제어 장치 등 압전 재료를 작동기로 사용한 연구 사례는 쉽게 찾아볼 수 있다.

### 3.3 압전 재료를 이용한 지능 구조물

1980년대 초반부터 유연 구조물의 진동 제어는 우주정거장 개발 등의 필요에 의해서 이론적으로 연구되었다. Forward와 Swigert [22]는 압전 재료를 이용한 간단한 제어를 수행함으로써 구조물의 감쇠를 증가시킬 수 있음을 보였다. Bailey와 Hubbard, Jr.[23]는 보 구조물에 압전 필름 작동기를 부착하여 진동 제어 실험을 수행하였다.

1990년대 초부터는 점차 빔, 평판 등의 시편에 정교한 해석과 제어 이론을 적용하였다. Bai와 Lin[24]은 DSP 제어기를 이용하여 보의 최적 진동 제어 실험을 수행하였다. Han 등[25]은 복합재 평판의 굽힘과 비틀림 모드의 최적 진동 제어 실험을 수행하였고, 황우석 등[26]은 압전 재료를 이용하여 복합재료 보의 능동 및 수동제어를 연구하였다. Gu 등[27]은 압전 필름의 전극 형상을 가공하여 만든 모달 감지기와 filtered-x-LMS 적응 제어 기법을 이용하여 평판의 특정 모드를 제어하였다. 유정규[28]는 분포형 압전 변환기의 설계 최적화를 수행하였고, Rew 등[29]은 적응 PPF 제어기를 이용하여 고유진동수가 변하는 구조물의 진동을 제어하였다.

1990년대 말부터는 선진국을 중심으로 압전 재료를 실제 구조물에 적용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. Herold-Schmidt 등[30], Liu 등[31]은 각각 항공기 동체 부위 및 선회하는 우주 구조물 축소 모델에 대한 진동 제어 실험을 수행하였다.

Fig. 6은 MSI사에서 개발한 스마트 스킨(smart skin)으로서 이를 이용하여 전투기 날개나 잠수함 날개의 표면 진동을 감지 및 제어하여 구조물의 성능을 높이려는 시도가 활발히 연구되고 있다.

Fig.7과 같이 압전 작동기를 이용하여 전투기의 흡입구

(inlet)를 가변시켜 전투기의 연료를 절약하여 전투기 활동 영역을 20% 까지 증가시킨 연구 결과도 보고되었다.

MIT와 Maryland 공대를 중심으로 아래와 같은 압전 섬유 작동기를 헬기의 로터 블레이드에 적용시켜 진동을 감소시켜 성능 향상을 꾀하고 있다. 압전 섬유를 사용함으로써 압전 세라믹이 잘 깨지는 단점을 극복하였고, 로터 블레이드 속에 삽입하는 일체형(integral) 구조로 제작되어 연속적인 변형을 가해 헬기의 공력탄성학적 특성을 좋게 하면서도 항력을 증가시키지 않는 장점이 있다.

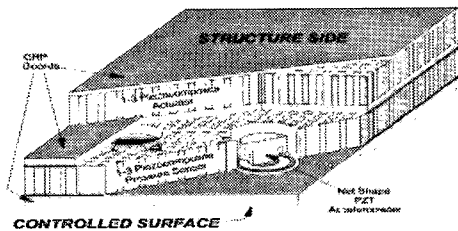


Fig. 6 Smart skin concept made.

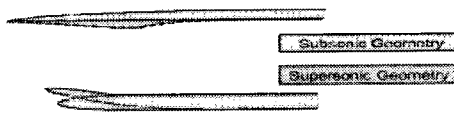


Fig. 7 Variable geometry fighter inlet[8].

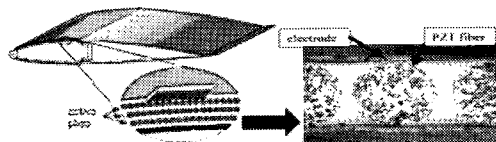


Fig. 8 Integral twist actuation concept[8,10].

또한, 아래와 같이 적응형 압전 작동기와 지렛대 원리를 이용한 압전 작동기를 로터 블레이드에 적용하여 공력 탄성학적 성능을 향상 시키려는 연구도 진행 중이다.

ACX 사에서는 Fig. 10과 같이 압전 작동기로 노즐을 조절하는 지능형 소형 댐퍼를 개발하였다. 이 지능형 댐퍼는 퍼지 알고리즘을 적용하여 노면 상태에 따라서 댐퍼의 특성을 가변시킨다. 퍼지 알고리즘에 의해서 압전 소자에 제어 명령이 전해지면 감쇠 용량을 조절한다.

Fig. 11은 PARTI 프로그램의 지원에 의해 연구된 것으로, 지능 구조물 개념을 도입하여 플러터 억제를 연구하였는데, 알루미늄 하니콤과 탄소/에폭시 스킨으로 구성된 비행기 날개에 36 개의 압전 작동기를 사용하여 플러터를 억제하였다.

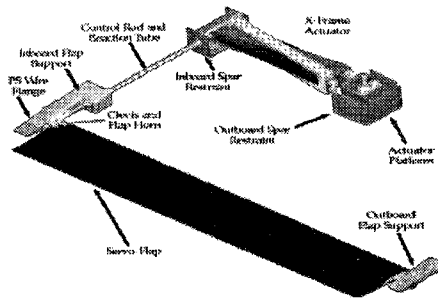


Fig. 9 Discrete piezoelectric actuator for trailing edge of rotor blade.



Fig. 10 Smart shock damper applied to mountain bike.

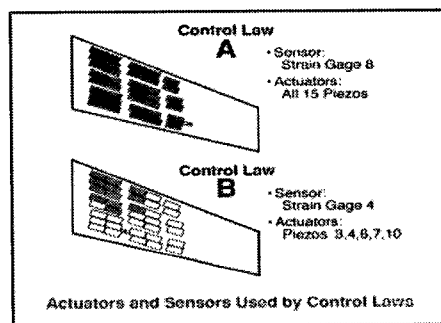


Fig. 11 Concept of PARTI program.

Fig. 12는 압전 세라믹을 수동 션트(passive shunt) 회로에 연결하여 제어기와 고전압 증폭기를 거치지 않고 간편하게 진동을 제어하는 장치의 개념도이다.

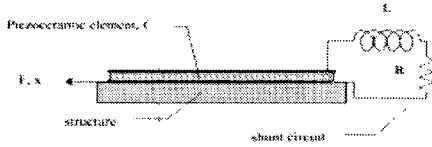


Fig. 12 Concept of passive shunting.

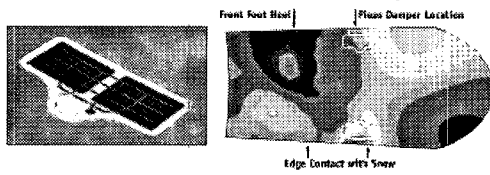


Fig. 13 Smart snow board.

위의 그림은 소자(device)화된 압전 선트와 이를 스노우보드에 적용했을 때의 진동 특성을 나타낸 것이다. 이 소자는 현재 ACX 사에 의해 상용화되어 고급 스키나 스노우보드, 야구 배트에 적용되고 있다.

Fig. 14는 히스테리시스가 적은 적층형 전왜 작동기를 이용하여 허블 망원경의 정밀한 각도 조절을 수행하는 장치이다. 전왜 작동기는 각 노드에 배치되어 외부의 진동을 저감시켜 보다 정밀한 영상을 얻을 수 있도록 작용한다.

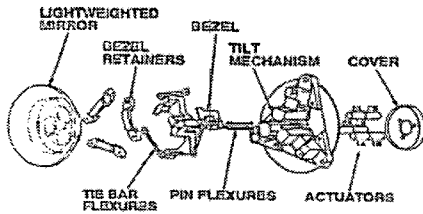


Fig. 14 Hubble telescope using PMN electroresistive actuator[6].

Fig. 15는 여객기 외부의 소음이 내부에 전파되지 못하도록 압전 재료를 이용하여 소음 제어하는 개념도이다. 선진국에서는 여객기 내부의 소음을 줄여 쾌적한 여행을 제공하려는 필요에서 이러한 내부 소음 제어(interior noise control)가 활발히 연구되고 있다. 그림에서 chess형 압전소자는 17%, line형 압전소자는 22%의 소음 저감 효과를 보여 압전소자의 패턴이 소음 제어에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 이러한 압전 소자의 패턴의 배치는 패널 플러터 억제(panel flutter suppression)에도 중요한 영향을 미치며 이

에 대한 최적화 연구가 활발히 수행되었다[32].

압전 재료의 적용 분야의 하나인 MAV(Micro Air Vehicle, 초소형 비행체)와 UAV(Unmanned Aerial Vehicle, 무인 항공기)에 대한 연구에서는 국방과 관련된 연구지원에 의해 상당한 진전을 보이고 있다. MAV는 1990년대 초반 미국의 MIT의 Lincoln 실험실과 GTRI (Georgia Tech Research Institute)에 의해 처음으로 시도되었다. 최근 DARPA에서는 MAV의 군사적 이용가능성에 주목하여 1997년부터 4년동안 MAV 프로그램을 추진하여 매년 65-300만불 정도의 연구비를 10개의 연구소 등에 지원하고 있다. 국내에서도 KAIST 및 건국대학교 등을 주축으로 초소형 비행체 연구회를 조직하여 연구활동을 수행하고 있다.

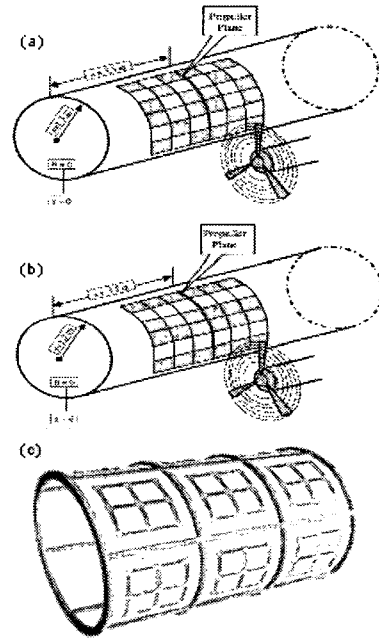


Fig. 15 Piezoelectric actuator configuration: (a)chess, (b)line[49] and (c)generalized[10].

압전 재료는 전자공학 발전에도 기여하여, 수백 MHz의 고주파에서 작동되면서 획기적으로 작아진 SAW filter, FM 신호의 수신에 쓰이는 위상 비교기(discriminator), 압전 변압기 등이 상용화 되어있다. 이상과 같이 지능 구조물의 구현을 위해 압전 재료를 응용한 연구는 다양한 분야에서 활발히 진행되고 있다. 국내에서는 압전 재료 소자나 핵심

부품을 거의 수입에 의존하고 있는 실정이므로 압전 재료의 응용 연구와 더불어 압전 재료와 관련된 연구 개발에 보다 많은 투자가 필요한 실정이다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 압전 재료를 응용한 연구 및 개발 동향에 대해서 살펴보았다.

지능 구조물에 대한 관심이 증가하면서 이의 구현을 위한 기능성 재료에 대한 연구가 증가하고 있다. 기능성 재료 중에서 감지기 및 작동기로 많이 활용되는 압전 재료는 활용 범위가 넓고 이에 관한 응용 연구 및 개발이 활발히 이루어지고 있다.

미국, 일본, 유럽 등의 선진국에서의 압전 재료를 이용한 지능 구조물에 대한 연구는 기초 연구의 단계를 지나 실제 구조물에 적용하려는 단계로 넘어가는 중이며, 압전 재료를 비롯한 기능성 재료의 응용에 대한 시장은 연 2 억 달러로 추산되고 있고, 미국에서 지능 구조물 관련 연구비로 투자하는 액수는 연간 5 천만 달러 이상이다. 미국에서는 주로 군용 비행기나 헬기의 진동 억제를 위한 연구가 일본에서는 초음파 모터나 SAW 필터 등 산업용 장비들이나 소비자들을 위한 연구 및 개발이 활발하고, 유럽에서는 실험 장비를 위한 연구가 활발하다.

국내의 연구 수준도 상당히 진전을 보이고는 있지만 핵심적인 연구나 기초적인 실험적 연구 단계를 넘어 성장하기 위해서는 압전 재료와 관련된 기초 연구와 응용 연구에 보다 많은 투자가 필요한 실정이다.

#### 후 기

본 연구는 2000년도 과학기술부의 국가지정 연구실(National Research Lab.) 사업에 의해 수행된 연구 결과의 일부이며, 지원에 감사 드립니다. 또한 자료준비에 많은 기여를 한 류근호 박사(미래산업)에게 감사를 표합니다.

#### 참고 문헌

- 1) Wada, B.K., Fanson, J.L. and Crawley, E.F., "Adaptive Structures," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 1, No. 2, 1990.
- 2) Crawley, E.F., "Intelligent Structures for Aerospace: A

- Technology Overview and Assessment," *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 8, 1994, pp. 1689-1699.
- 3) Gandhi, M.V., and Thompson, B.S., *Smart Materials and Structures*, Chapman & Hall, 1992.
- 4) 김진수, 압전 액츄에이터와 초음파 전동기, 도서출판 명현, EMDEC 교재 시리즈, 2000.
- 5) Benjeddou, A., "Advances in piezoelectric finite element modeling of adaptive structural elements: a survey," *Computers and Structures* 76, 2000, pp. 347-363.
- 6) Uchino, K., "Recent Trend of Piezoelectric Actuator Developments," *International Symposium on Micromechatronics and Human Science*, 1999, pp. 3-9.
- 7) Wise, S.A., "Displacement properties of RAINBOW and THUNDER piezoelectric actuators," *Sensors and Actuators A - Physical*, Vol. 69, No. 1, 1998, pp.33-38
- 8) Hanselka, H., "Smart Structure Applications in Mechanical Engineering Based on PZT Fibers and Patches," *Proceedings of ICAST*, 1999, pp. 3-10.
- 9) Bronowicki, A., Innis, J., Casteel, S., Dvorsky, G., Alvarez, O. and Rohleen, E., "Active Vibration Suppression using Modular Elements," *SPIE's Symposium on Smart Structures and Materials*, Vol. 2190, Feb. 1994, pp. 717-728.
- 10) Tomkins, W.J., Webster, J.G., et al., *Interfacing Sensors to the IBM PC*, Prentice-Hall Inc., 1988, Ch.9.
- 11) Beckwith, T.G., Marangoni, R.D., *Mechanical Measurements*, Addison Wesley Pub., 1990. Ch. 7.
- 12) 김상채, "초정밀 회전모터의 설계와 해석에 관한 연구," 한국과학기술원 공학박사 학위 논문, 2000.
- 13) Lfdahl, L., and Gad-el-Hak, M., "MEMS Application in Turbulence and Flow Control," *Progress in Aerospace Science*, 1999, 35, pp. 101-120.
- 14) Bryzek, J., Peterson, K., and McCulley, W., "Micromachines on the March," *IEEE Spectrum*, 1994, 31, pp. 20-31.
- 15) Royer, M., Holmen, P., Wurm, M., Aadland, P., and Glenn, M., "ZnO on Si Integrated Acoustic Sensor," *Sensors Actuators A*, 1983, 4, pp. 357-362.
- 16) 이봉훈, 그림으로 알 수 있는 센서 이야기, 도서출판 세화, 1998.
- 17) 이정훈, 압전세라믹을 이용한 사각보형 진동자이로의 설계, 제작 및 평가, 한국과학기술원 석사학위논문, 1995.
- 18) Hemsell, T., and Wallascheck, J., "Survey of the Present



- State of the Art of Piezoelectric Linear Motors," *Ultrasonics*, Vol. 38, 2000, pp. 37-40.
- 19) Lim, C.K., He, S., Chen, I.M., and Yeo, S.H., "A Piezo-on-Slider Type Linear Ultrasonic Motor for the Application of Positioning Stages," *Proceedings of ICAST*, 1999, pp. 103-108.
- 20) Claeyssen, F., Letty, R.L., et al., "High Stroke/Precise Positioning Piezo Actuators and Motors," *Proceedings of ICAST*, 1999, pp. 354-361.
- 21) Frank, J., Mockenstrum, E.M., Chen, W., et al., "Roller-Wedgeworm : a Piezoelectrically -Driven Rotary Motor," *Proceedings of ICAST*, 1999, pp. 92-99.
- 22) Forward, R.L., and Swigert, C.J., "Electronic Damping of Orthogonal Bending Modes in a Cylindrical Mast -Theory," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 18, 1981, pp. 5-10.
- 23) Bailey, T., and Hubbard Jr., J.E., "Distributed Piezoelectric Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 8, No. 5, 1985, pp. 605-611.
- 24) Bai, M.R., and Lin, G.M., "The Development of a DSP-Based Active Small Amplitude Vibration Control System for Flexible Beams by Using the LQG Algorithms and Intelligent Materials," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 198, No. 4, 1996, pp. 411-427.
- 25) Han, J.-H., Rew, K.-H., and Lee, I., "An Experimental Study of Active Vibration Control of a Composite Structures with a Piezo-Ceramic Actuator and a Piezo-Film Sensor," *Smart Materials and Structures*, Vol. 6, No. 5, 1997, pp. 549-558.
- 26) 황우석, 황운봉, 한경섭, 박현철, "압전 재료를 이용한 복합재료 보의 능동 및 수동 제어," *대한기계학회논문집*, 제 17권, 제 3호, 1993, pp. 485-491.
- 27) Gu, Y., Clark, R.L., Fuller, C.R., and Zander, A.C., "Experiments on Active Control of Plate Vibration Using Piezoelectric Actuators and Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Modal Sensors," *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 116, 1994, pp. 303-308.
- 28) 유정규, 지능구조물의 진동제어를 위한 분포형 압전변환기의 설계 최적화, 서울대학교 공학박사학위 논문, 1998.
- 29) Rew, K.H., Han, J.H., and Lee, I., "Adaptive Multi-modal Vibration Control of Wing-like Composite Structure Using Adaptive Positive Position Feedback," *AIAA SDM Conference*, Paper No.2000-1422, 2000.
- 30) Herold-Schmidt, U., Schafer, W., and Zaglauer, H., "Piezoceramics/CFRP Composites for Active Vibration Control and Shape Control of Aerospace Structures," *Proceedings of the Third International Conference on Intelligent Materials*, Lyon, France, 1996, pp. 718-723.
- 31) Liu, Y.C., and Yang, S.M., "Vibration Control Experiment of a Slewing Flexible Beam," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 117, 1995, pp. 432-435.
- 32) Suleman, A., "Adaptive Composites Modelling and Application in Panel Flutter and Noise Suppression," *Computers and Structures*, Vol. 76, 2000, pp. 365-378.