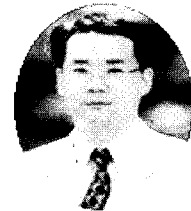


## 지능재료 및 지능구조물 기술 동향



김 재 환\*

### 1. 서 론

수십 년 동안 엔지니어들과 과학자들은 진보적인 로봇이나 기계 시스템 설계에 자연을 영감으로 이용해 왔다. 오늘 날 자연은 완전히 새로운 단계의 재료 시스템 즉, 지능 재료 시스템에 대한 영감이 되고 있다. 노화되는 공정과 변화하는 환경을 수용하기 위해 물질의 구조, 조직 형상 그리고 특성 등을 적응시켜 가는 자연의 능력과 생물학적인 유사성은 특수한 기능을 갖춘 재료를 설계하는데 이용되어져 왔다. 이러한 재료는 스스로 형태를 변화시킬 수 있고 자신의 작동 상태를 감시하고 진동을 제어하며, 외부환경 변화에 능동적으로 적응할 수 있는 특성을 갖고 있다. 이러한 재료를 지능 재료(Smart Materials)라고 한다. 지능재료를 구조물에 통합하여 환경의 변화에 대처할 수 있는 능력을 지니도록 한 시스템을 지능구조물(Smart Structures)이라고 한다. 지능재료 및 지능구조물은 자연계에 존재하는 생명체와 같이 내·외부 환경 변화에 대응하여 스스로 변화하는 능동적 기능을 갖고 있다.<sup>1),2)</sup> 따라서 지능 재료 및 구조물은 생명체의 감각 신경계와 같이 시스템에 접합 혹은 삽입된 센서를 통해 내부 및 외부의 자극과 현상을 감지한다. 생명체의 두뇌계가 신경계를 통해 얻은 정보를 토대로 판단하고 지시하는 것처럼, 센서 신호를 바탕으로 마이크로프로세서와 제어 알고리즘이 연계된 시스템이 환경조건 변화를 판단한 후 알맞은 조치를 취할 수 있도록 신호를 발생한다. 이러한 시스

템은 내·외부 환경변화에 대하여 자체 처리 능력을 보유하고 있기 때문에 시스템 성능의 극대화 및 유지비용의 최소화를 가져오게 된다. 그림 1은 지능재료/지능구조물의 개념을 나타낸다.

지능 재료 및 구조물 기술은 센서 기술, 액추에이터 기술, 제어 기술, 그리고 시스템 통합 기술로 이루어지며 각종 산업, 국방, 의학 분야에 광범위하게 응용되는 새로운 개념의 기술이다. 지능 재료 시스템은 센서, 액추에이터 제어기를 시스템에 통합하는 새로운 설계 철학이다. 따라서 센서 기술, 액추에이터 기술, 제어기술, 재료 기술, 통합 기술, 그리고 응용 기술의 다양한 영역의 전문가들이 현상에 대한 연구, 시스템 개념 정립, 재료의 선정 및 개발, 센서 설계, 액추에이터 설계, 시스템 통합, 제어, 해석, 모형화 그리고 응용에 대한 연

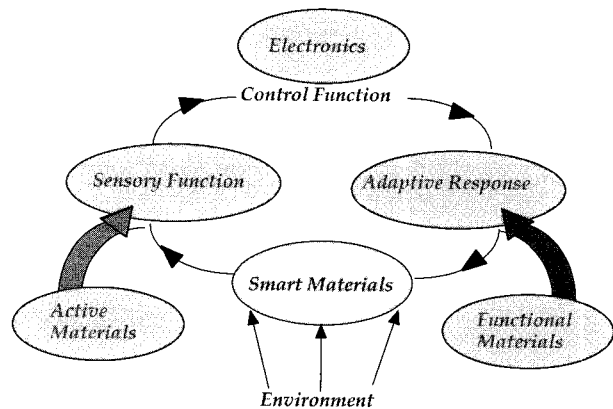


그림 1 지능재료/지능구조물의 개념

\* 정희원 · 인하대학교 기계공학과 부교수

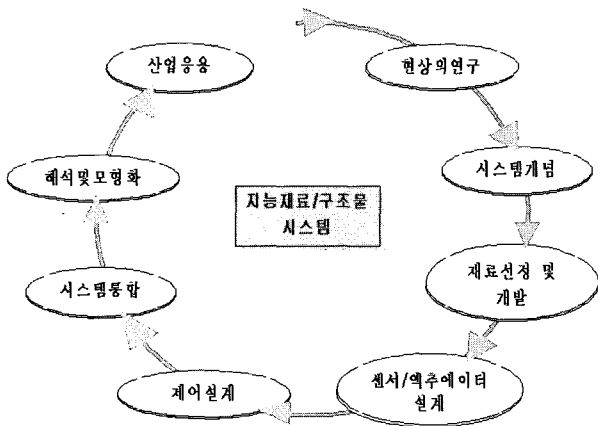


그림 2 지능재료/ 지능구조물 기술의 구성체계

구를 수행한다. 본 논문에서는 지능재료 및 지능구조물 기술을 소개하고 국내외 연구동향을 소개한다.

## 2. 지능재료 기술

지능 재료 시스템을 구성할 수 있는 재료의 종류는 수십 종류가 있지만, 실용화 측면에서 가장 활발히 연구되고 있는 것은 다음과 같다. 전기장과 자기장에 따라 유변학적 성질이 제어될 수 있는 ER(Electro-Rheological) 및 MR(Magneto-Rheological)유체, 기계적 변형에 의해 전기적 신호가 발생하고, 전압인가에 의해 기계적 변형이 발생하는 압전재료(Piezoelectric Material), 온도(혹은 열) 조절에 의해 기억된 형상이 제어될 수 있는 형상기억합금(Shape Memory Alloy), 폴리머에 전기적 신호를 인가함에 따라 근육과 유사하게 탄성을 지니면서 큰 변형을 생성하는 EAP(Electro-Active Polymer), 그리고 지능 재료 시스템의 센서로 매우 효과적인 광섬유(Optical Fiber)등이다. 일반적으로, 지능재료 기술은 센서 기술, 액추에이터 기술, 제어 기술, 그리고 시스템 통합 기술로 이루어지며 각종 산업, 국방, 의학 분야에 광범위하게 응용되는 새로운 개념의 기술이다.

### 2.1 압전재료/자기변형재료

압전재료는 부하되는 전압에 반응하여 기계적 힘을 발생시키게 된다. 압전재료의 경우는 재료에 부하되는 전기장에 따라 재료내부의 전기적 쌍극자들이 나란히 정렬되어 결정구조가 변형되어 압전재료의 형상을 변화시키게 된다. 이 경우, 최대 200~300  $\mu\epsilon$  변형이 가능하다. 압전재료는 이렇게 작은 변형을 발생시키지만 만일 어떤 구조물에 구속되게 되면 빠른 응답속도를

갖고 부하되는 전압에 비례하는 큰 힘을 발생시키게 된다. 압전작동기들이 사용된 예로는 능동음향 및 진동 감쇠제어, 능동손상 제어, 미소위치 이동로봇, 광학추적 장치, 스피커, 적응 광학시스템 등이 있다.<sup>3,4)</sup>

자기변형재료는 압전재료와 유사하나 전기장 대신 부하되는 자기장에 반응하여 기계적 힘을 발생시키게 된다. 자기변형재료는 상자성체로 내부의 자기영역들이 자기장 안에 위치하였을 때, 자기장과 나란히 정렬될 때까지 회전하게 되고, 이것은 자기변형재료를 팽창시켜 큰 변위를 발생시키게 된다. 이 자기변형재료 중 현재 많이 연구되는 테페놀-디(terfenol-D)는 지구상에서 희귀한 요소인 테르븀(terbium), 디프로슘(dysprosium) 그리고 철(Fe)을 기본으로 조성된 합금으로 자기장과 정렬작용에 의해 최대 1400  $\mu\epsilon$  변형이 가능하다. 이러한 자기변형재료는 압전재료보다 큰 변위와 힘을 발생시킬 수 있으나 반응속도가 압전재료에 비해 상당히 느려 주된 적용 예로, 높은 토크와 낮은 회전속도를 갖는 모터, 큰 토크를 갖는 초정밀 스텝모터 및 능동진동 감쇠시스템 등이 있다.<sup>5)</sup>

### 2.2 ER/MR유체

ER/MR유체는 전기장 혹은 자기장에 반응하여 유동학적 성질(점성, 가소성, 탄성)의 가역변화를 나타낸다. 이러한 유체들은 마이크로미터 크기의 입자와 절연성의 오일로 구성되며 부하되는 전기장에 반응하여 유체의 가점성을 현저히 증가시키게 한다. 또한, 이 유체는 운동부분이 없이 작동기로 작동되므로 각종 기계 시스템 설계의 단순화를 가져올 수 있으며, 상변화를 위해 요구되는 전력이 매우 낮고 유체의 반응속도가 빠른 장점이 있다. 이런 우수한 특성 때문에 지능구조물을 비롯하여 각종 속압소마, 엔진마운트, 시트멤버, 서보유압밸브, 클러치, 브레이크, 정밀테이블, 그리고 로봇 팔 등에 적용이 연구되고 있다.<sup>6)~8)</sup>

### 2.3 EAP

최근 EAP에 대한 관심은 큰 변형을 낼 수 있는 EAP 재료들이 개발됨에 따라 그 응용 가능성에 대하여 많은 나라에서 더욱 높아지고 있다. 아주 관심을 끄는 특징은 EAP는 생체 근육과 유사한 작동을 할 수 있다는 것으로 특별히 탄력성과 큰 변형을 낼 수 있고 낮은 밀도와 제작의 용이함이 다른 지능재료에 비교하였을 때

장점이다. 이러한 지능재료의 개발은 로봇, 생체, 항공, 우주, MEMS 등 많은 산업 분야에 새로운 기술 혁신의 기대를 불러일으키고 있다.

EAP는 전기장에 의해 작동되는 것과 이온에 의해 작동하는 것으로 대별되며 전기장에 의한 것은 압전, 전왜, 강유전성의 재료로 나눌 수 있고, 이온화에 의한 것은 전기장이 가해졌을 때 폴리머 내부에 이온의 편류가 발생하여 변형이 발생하는 것으로 폴리머 젤과 이온 박막이 있다. 이외에도 탄소나노튜브, 종이, 천, 유체 등의 다양한 EAP가 현재 연구되고 있다.<sup>9)</sup>

이러한 재료의 연구는 재료분야, 화학, 전기, 역학, 컴퓨터, 전자, 기계, 항공 등 다양한 학문 분야가 서로 연관되어 있다. 응용 예로서 최근에 dust wiper, 소형 로봇아암, 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. EAP의 작동능력에 대한 향상이 재료의 근본적인 레벨에서 연구되고 있으며, 이러한 노력은 새로운 제조기법과 아울러 재료의 성능을 빠르게 이해하고, 성능향상을 위한 조건을 정하는 연구와 병행되고 있다.

### 3. 지능재료의 국내외 연구동향

지능 재료 및 구조물의 연구는 10여년 전부터 미국에서 주도적으로 시작되어 일본, 유럽에서 항공, 우주, 자동차, 군사, 의료 분야의 응용을 목적으로 활발히 진행되고 있다.

#### 3.1 압전재료/자기변형재료

압전재료에 대한 연구는 그 역사가 길며 또한 문헌상에도 많이 나와 있다. 잘 알려진 바와 같이 약 100여년 전 Curie와 Pierre는 크리스탈 변형 시 전하가 발생하는 것과 전압 인가 시 변형이 발생한다는 사실을 처음 발견했다. 그 이후 압전재료는 산업, 군사, 의료 등 여러 분야에서 응용되어 왔으며, 특히 제2차 세계대전 이후 압전세라믹과 압전폴리머 계통의 재료 개발 이후 가속도 센서를 비롯한 각종 진동센서와 작동기 개발 등 그 응용 범위가 급속히 확장되었다.<sup>10),11)</sup>

압전재료를 이용한 구조물 시스템의 설계 및 제작 기술은 적용 대상에 따라 매우 다양하며 지금까지 미국과 일본을 비롯한 선진국에서 추진되어 온 설계 및

제작 기술은 주로 작동기와 감지기의 위치 선정과 그 형상에 중점을 두어 왔다. 미국의 Bailey와 Hubbard<sup>12)</sup> 등은 압전폴리머의 모양을 변화시켜 구조물 시스템을 설계하여 특정한 요구 성능을 얻었다. 그리고 NASA Langley/MIT 에서는 6피트 길이의 항공기 날개의 Flutter 제어를 위해 Active Control Expert(ACX)사와 공동으로 PZT Quick Pack이라는 제품을 설계하여 제작하였다. 이 PZT Quick Pack은 단일 압전 혹은 여러 압전 작동기로 구성되어 있으며, 이 안에 필요한 전기회로가 있어 별도의 부가 전압공급장치가 필요 없다. 그러나 아직 평판형의 Module식 제품 설계 기술에만 성공하였을 뿐 다양한 형상의 압전재료가 있을 경우의 설계와 연결 가능한 어셈블리 모듈 설계기법은 개발되고 있지 않다. ACX사는 PZT를 이용 진동제어 기능이 있는 소위 '스마트 스키'를 상품화하여 판매하고 있는 단계에 있다. 그리고 일본에서는 최근 반도체 제조 장비의 하나인 정밀 테이블의 진동절연을 위하여 압전작동기를 이용한 마이크로 진동제어기법을 연구하고 있다. 1995년 동경대학의 Fujita교수와 Hitachi 사의 Hayatsu 등은 2000kg무게의 정밀 테이블의 마이크로 진동 절연을 위한 설계 및 제작기술을 연구하였다. 또한 일본에서는 압전재료를 이용한 건물 및 교량의 댐퍼 설계 및 제작 기술의 연구에서 향후 예상되는 추진 방향은 설계의 단순화 및 범용성, 제작의 용이성, 고장 수리의 용이성 등에 주안점을 두고 있다.

압전재료는 각종 작동기 및 모터에 많이 쓰이고 있다.<sup>3),13)</sup> 압전재료를 이용한 압전모터(Piezoelectric motor)는 70년대 말에 소련에서 랑제빈(Langevin)형 진동기를 이용하여 처음 개발된 이후로 여러 가지의 형태가

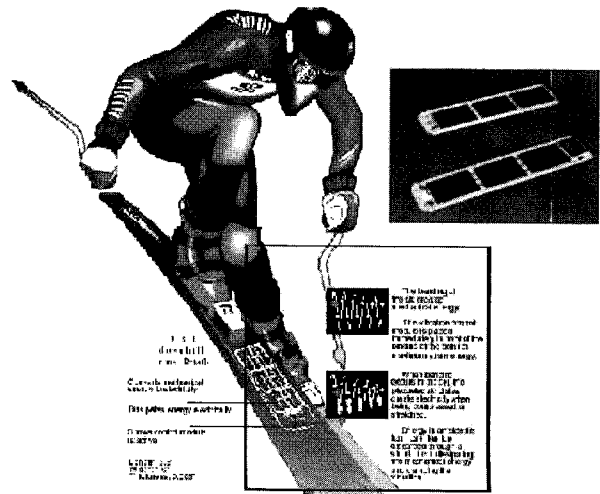


그림 3 Smart Ski

고안되었다. 이러한 압전모터는 소형-경량화 할 수 있고, 빠른 응답성과 정역전이 쉬운 직접적인 운동성 그리고 정밀한 위치 제어 및 저속에서의 높은 토크를 낼 수 있는 가능성 때문에 특정한 분야에 있어서 기존의 전자식 모터를 대체할 수 있는 것으로서 많은 관심이 모아지고 있다. 응용 예로서는, 일본 캐논사의 EOS 시리즈의 자동초점조절 카메라에 쓰인 것이 있다. 이러한 압전모터의 장점이라면 빠른 응답, 정밀한 제어, 저속에서의 높은 토크, 전자기장에 의한 간섭이 없으며 소음이 적다는 것이다. 압전모터는 전자기장의 간섭에 영향을 받지 않기 때문에 강한 자기장이 작용하는 환경에 회전 모터의 기능이 필요할 때 기존 모터의 역할을 대신하여 사용할 수 있다. 실제로 미국 텍사스에 있는 초전도 가속기에 쓰인 예가 있다. 이때의 환경은 9 Tesla의 강한 자기장과 4K의 초저온에서 자기장을 측정하기 위하여 측정자를 회전시키는데 압전모터가 사용되었다. 압전모터를 사용하여 정밀한 피펠텩을 하는 마이크로 피펠텩(micropipetting)장치를 만들기도 하였다.<sup>14)</sup> 압전모터는 저속에서 높은 토크를 낼 수 있는 등 여러 가지 장점이 있으므로 산업의 전반에 걸쳐서 기존에 쓰이던 전자식 모터를 특정 부분에 대해서 대체할 수 있을 것으로 생각된다. 특히 소형, 정밀한 조절이 필요한 모터에는 압전모터가 매우 우수하다. 예를 들면 주사탐침 현미경(scanning probe microscope, SPM)의 초정밀한 해상도를 내는 기구에 압전모터가 쓰이고 있다.<sup>15)</sup> 뿐만 아니라 초정밀 로봇 및 각종 계측 및 의료기기 그리고 반도체 등 산업설비의 초정밀 제어에 압전모터가 쓰일 수 있다. 압전재료를 이용한 모터 및 작동기는 미국, 일본, 독일이 세계에서 가장 앞선 기술을 보유하고 있다. 이외에도 응용예로는 자동차 airbag 센서, 압력제어장치, 자이로센서, THUNDER 압전 작동기, 6자유도 플랫폼, 항공기날개의 플러터제어, 항력제어, 헬리콥터 회전익 진동제어, 팬, 가전제품, 산업 설비의 능동 소음/진동 제어, 우주 유연구조물의 진동제어 등이 있다.

한편, 자기변형재료를 이용한 제어시스템에 대한 연구는 주로 미국에 의해 주도되고 있다. 미국의 Virginia Polytechnic Institute 주립대<sup>16)</sup>에서는 자기변형작동기를 적용한 유연구조물용 속압소바를 개발하고 작동기의 비선형적 특성에 대한 실험을 수행하였다. 또한, 이 대학에서는 자기변형작동기를 장착한 외팔보를 구성하여 제어기 적용에 따른 보의 진동절연실험을 수행하여 자기변형작동기의 우수성을 발표하였다. Maryland대<sup>17)</sup>

에서는 자기변형입자의 우수한 접합성을 이용한 새로운 차원의 작동기를 제안하였다. 이 자기변형입자작동기는 입자하나 하나가 작동기 역할을 하는 것으로서, 외팔보에 성공적으로 적용하여 작동기 특성에 대한 실험을 수행하였다. Michigan 공업대<sup>18)</sup>에서는 선반과 같은 절삭기계의 공구진동을 제어하기 위한 자기변형작동기를 개발하여 실험을 수행하였다. 그 결과 자기변형작동기 적용으로 실험이 수행된 선반의 절삭가공성이 크게 향상됨을 실험적으로 고찰하였다.

국내에서 압전재료를 이용한 구조물 시스템에 대한 연구를 보면 압전재료를 이용한 유연기구의 진동제어,<sup>19)</sup> 소음제어,<sup>20)</sup> 복합재료 구조물의 진동제어<sup>21)~24)</sup> 등이 있다. 압전재료를 이용한 모터 및 작동기의 국내연구로는, 진행파형 압전모터의 개발,<sup>25)</sup> 비틀림형 회전작동기, 회전스텝모터, 그리고 새로운 작동셀 개념의 선형모터의 개발<sup>26)~28)</sup> 이 있다. 나노메카트로닉스 프론티어 사업단에서는 압전작동기를 사용한 나노구동 스테이지를 연구하고 있다.<sup>29)</sup>

자기변형재료를 이용한 제어시스템에 대한 국내 연구는 아직 미미한 실정이나 몇몇 대학을 중심으로 이에 대한 연구가 수행되고 있다. 선형 자기변형 작동기와 이들로 구성된 정밀 스텝모터,<sup>5)</sup> 자기변형재료 작동기를 장착한 시스템에 슬라이딩 모드 제어기 적용한 진동절연시스템<sup>30)</sup> 등이 있다.

### 3.2 ER/MR유체

ER/MR유체관련기술의 선진국으로 미국, 영국, 일본 등을 들 수 있다. 미국의 기술동향으로, Michigan대, North Carolina주립대, Wisconsin대 등에서는 새로운 ER유체 개발과 점탄성 거동에 대한 연구를 수행하고 있으며, Ford자동차 및 RheoActive사에서는 ER유체를 응용한 속압소바, 엔진마운트등을 개발하고 있다. 특히 Ford자동차사는 ER엔진마운트의 시작품을 제작하여 시험연구를 수행하였다.<sup>31)</sup> RheoActive사에서는 ER속압소바, ER엔진마운트에 대한 연구도 수행하고 있다.<sup>32),33)</sup> Lord Corporation사는 사용조건에 따른 여러 종류의 MR유체<sup>34)</sup>도 개발하여 판매하고 있으며, MR클러치 및 MR브레이크 등과 같은 MR응용장치의 개발에도 활발한 연구를 수행하여 최근에는 승용차에 MR 속압소바를 장착하기도 하였다. Maryland대<sup>35)</sup>는 대형구조물인 항공우주구조물 적용을 위한 ER/MR댐퍼의 개발과 기존 시스템보다 안정한 헬기로터시스템과 랜딩기어를 연구하고 있다.

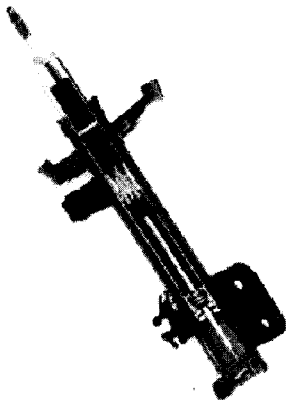


그림 4 Cadillac용 속압소바

영국의 기술동향으로, ER Fluids Developments사, Cranfield공대, Liverpool대, 그리고 Sheffield대 등에서는 새로운 ER유체시스템 연구를 수행하고 있다. Cranfield공대의 Block<sup>37)</sup>은 무수계의 반도체 고분자 ER유체를 개발에 심혈을 기울이고 있으며, Sheffield대의 Stanway, Bullough 등은 ER클러치 시스템 및 ER엔진마운트등 응용장치개발과 이와 연관된 전압공급장치 개발에 많은 연구를 하고 있는 중이다.<sup>37),38)</sup>

일본의 기술동향으로 Nippon Shokubai사, Asahi Chemical Industry사, 그리고 Fujikura Kasei사는 새로운 형태의 균일계 및 비균일계 ER유체조성에 대한 연구를 진행하고 있다. 이 회사들은 공동으로 ER Consortium을 구성하여 ER유체관련 기술의 표준화 작업 및 기술정보교환을 통하여 향후 시장개척에 대비하고 있다. Yokohama국립대<sup>49)</sup>와 Bridgestone사<sup>40)</sup>는 ER엔진마운트 및 ER스퀴즈필름댐퍼 등 응용장치개발에 대하여 활발한 연구를 수행하고 있다. 중국, 오스트리아, 호주, 아르헨티나 등 세계 곳곳에서 ER/MR유체기술개발에 대한 연구를 수행하고 있어 더욱 치열해지는 국제 경쟁력시대에 신기술 개발의 필요성이 절실함을 알 수 있다.

국내에서는 인하대학교에서 수계 및 비수계 ER유체를 조성하고 이에 대한 미시적 및 거시적 특성연구를 수행하고 있으며, 국방과학연구소와의 공동연구로 ER댐퍼 및 이를 장착한 기동장비의 현가장치를 개발하였다.<sup>41)</sup> 이외에도 승용차용 및 군용 ER현가장치, ER마운트, 등을 국가지정연구실로 지정받아 개발하고 있다. 또한, 인하대학교 기계과에서는 MR클러치 및 브레이크와 같은 MR응용장치개발에도 활발한 연구를 수행하고 있다.<sup>42)</sup> 서울대학교 화공과에서는 수분이 함유된 실리카계 ER유체의 ER효과에 대한 수치모사 및 유변학적 연구와 유체역학적 모델링에 대한 연구가 지속적인

로 수행되고 있으며, 한국과학기술원 화공과에서는 ER유체의 점탄성 특성 및 고온 활성용 ER유체 개발에 대한 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 서강대학교 기계과에서는 만도기계와 승용차용 ER댐퍼를 개발하고 있으며, 정부출연연구소인 한국과학기술연구원에서도 러시아와 공동으로 ER유체개발 및 고전압공급장치 개발 연구를 수행하고 있다. 한국과학기술원에서는 헬스용 및 자전거용 MR댐퍼를 개발하기도 하였다.

### 3.3 EAP 디바이스

EAP는 근육과 같은 성능을 낼 수 있는 가능성으로 인해 많은 관심이 모아지고 있다. 펜실베니아 주립대학의 Dr. Zhang은 P(VDF-TrFE)에 전자 방사를 시킴으로서 괄목할 만한 전왜현상을 얻을 수 있음을 발견하였다.<sup>43)</sup> 그 결과 바이모프 형태의 작동기로 만들었을 때 5%이상의 변형을 얻을 수 있고 1GPa 이상의 탄성계수를 가지고 있으며, 100kHz 이상까지도 작동이 가능하다. SRI International에서는 지난 10년간 유연 전극이 입혀진 탄성중합체의 전기장 인가에 따른 응답에 기인한 electrostrictive polymer artificial muscle(EPAM)을 연구하고 있다.<sup>44)</sup> 작동원리는 두 개의 유연 전극 사이에 탄성 중합체를 적층시키고 상하의 두 전극사이에 전위차를 걸어 주면 폴리머는 두께 방향으로 늘려지면서 평면 방향으로 늘어난다. 이 변형은 전기장의 자유전하로 인한 정전기력에 기인한 것으로 알려져 있다. 최근에는 3M사에서 제작하는 VHB4910 acrylic 탄성중합체를 사용했을 때 양방향 대칭의 제한 하에서 300% 이상의 평면 변형을 일으킴을 발견하였다. acrylic EPAM을 사용하여 6축 보행로봇, 음향 스피커나 소음제어를 위한 음원, 그리고 power shoes의 전원발생장치의 개발을 연구하고 있다.<sup>45)</sup>

이온 폴리머 젤에 대한 연구는 Arizona대학의 Calvert,<sup>46)</sup> 비이온 폴리머젤은 일본 Shinshu대학의 Hirai,<sup>47)</sup> 동경대학의 Inoue교수팀<sup>48)</sup>을 비롯하여 헝가리 부다페스트 대학에서는 자기장에 의해서 작동하는 ferrogel을 연구,<sup>49)</sup> 개발하고 있다. 이러한 폴리머젤은 기어 다니는 곤충과 같은 로봇을 만드는데 쓰일 수 있다. 펜실베니아 주립대에서는 PVA과 DMSO를 주원료로 하는 electro-active polymer actuator(EAPA)를 개발하였으며, 5%이상의 변형률을 낼 수 있음을 보고하였다.<sup>50)</sup> 개발된 EAP를 사용하여 실내소음제어에 응용한 결과 200-2000Hz의 소음에 대하여 10dB의 저감효과를 얻었다.

IPMC는 가장 일반적으로 알려진 EAP로서, 낮은 전기장이 인가되었을 때에는 큰 굽힘 변형을 내며 현재 주로 사용되는 것으로는 기본 폴리머 Nafion에 금속성 전극이 입혀진 perfluorinated IPMC이다. 미국 JPL과 AMRI에서는 화성 탐사선의 시료채취용 그리퍼, 와이퍼 등을 IPMC를 이용하여 만들었으며<sup>51)</sup> 일본 ONRI에서는 능동 Catheter를 개발하였고 무소음 수영로봇, 산호초와 유사한 섬모, 조립형 로봇, 날개를 저어서 날아가는 기구 등에 응용하는 노력을 경주하고 있다.<sup>52),53)</sup> IPMC는 내구성이 좋고 건조조건에서도 사용할 수 있으며 센서로서의 역할도 하므로 다양한 응용이 가능하다.

뉴멕시코 대학의 AMRI에서는 굽힘형이 아닌 수축형 인공근육을 모사할 수 있는 conductive polyacrylonitrile (C-PAN)을 개발하였다.<sup>54)</sup> 현재는 백금, 금, 흑연, polypyrrole과 같은 도전성소재를 복합하여 사용함으로써 C-PAN을 가수분해 셀 내에 설치하였을 때 20V의 전기장에 100%의 변형이 발생함을 보였다. 앞으로는 탄소나노튜브를 사용하여 성능을 향상시킬 계획을 갖고 있다.

도전성 폴리머는 지능재료 시스템에 요구되는 성질들을 갖고 있으므로 새로운 기능성 재료로서 각광 받고 있다. 도전성 폴리머에서는 polypyrrole(PPy), polyaniline(PANi) 그리고 Polythiophene(PTh)의 3종류가 주로 지능재료로 이용되고 있다. 도전성 폴리머를 이용한 3층 구조의 작동기는 호주 Wollongong 대학,<sup>55)</sup> 스페인의 Otero,<sup>56)</sup> JPL의 Bar-Cohen등 여러 곳에서 성공적으로 만들었으며, 스웨덴 Linkopings 대학에서는 도전성 폴리머 작동기를 이용하여 개별적으로 제어할 수 있는 팔꿈치, 팔목 및 2~4개의 손가락을 가진 로봇아암을 만들었다.<sup>57)</sup>

이외에도 근육과 같은 특성을 갖는 단일 폴리머 체인의 molecular EAP, 탄소나노튜브를 이용한 작동기,<sup>58),59)</sup> 종이에 전기장을 인가할 때 변형이 발생하는 Electroactive Paper,<sup>60)</sup> 변형을 감지하고 전기장에 의해 변형할 수 있는 지능천<sup>61)</sup>(smart fabric), 장력을 조절하는 Smart Bra등 폴리머로부터 변형된 다양한 종류의 EAP가 연구되고 있다.

국내의 EAP연구는 21세기 프론티어사업 중 하나인 지능형 마이크로시스템 개발의 세부과제로 EAP작동기 개발을 위한 연구가 지난 3년간 있었다.<sup>62)</sup> 이 사업은 캡슐형 내시경으로 인체 내에서 진단 및 치료기능을 갖는 복합기능이 집적된 의료용 마이크로시스템의 개발을 위한 것으로, 체내 이동 메커니즘으로서 EAP를 연구하고 있다. 최근에, 종이를 이용한 EAPap(Electro

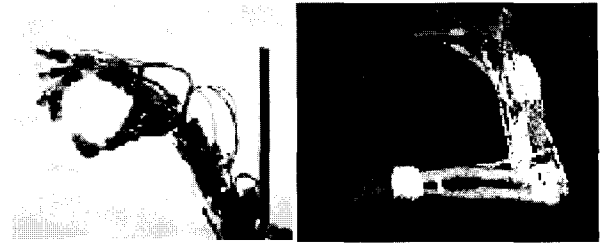


그림 4 EAP 작동기

Active Paper)가 인하대학에 의하여 발표되었으며 창의 연구단에서 이를 연구하고 있다.<sup>60)</sup> 2MV/m의 전압을 인가하였을 때 길이대비 약 10%의 변형이 나오는 것을 보고하였는데, 이러한 변형은 매우 큰 변형일 뿐만 아니라, 인위적으로 수분을 가하지 않아도 작동이 되므로 유리하다. 더군다나, 작동 전력이 10mW/cm<sup>2</sup>로 낮으므로, 마이크로파를 이용한 작동이 가능하여 초소형 비행체의 날개 등 다양한 응용이 가능할 것으로 내다본다.

EAP는 국내에서는 아직 초기 단계의 연구이므로 연구 인프라 구축을 위한 학제적 연구가 선행될 때 창의적인 분야에도 응용할 수 있는 날이 속히 다가올 것이다.

이 외에도 지능구조물 시스템의 한 예로서 복합재료 구조물에 광섬유를 심어서 구조물의 건전성을 평가하는 시스템의 연구도 개념증명 차원에서 진행되고 있다. 일본 통산성에서는 NEDO(New Energy and Industrial Technology Development Organization) 프로그램은 섬유 또는 포일 형상의 센서재료(신경)와 액추에이터(근육)를 구조물(골격)에 통합하여 감지, 진단, 응답의 지적 기능을 구조물에 부여하는 핵심기술을 개발하는 것이다. 연구 과제의 구성을 보면, 건전성 평가기술, 지능 구조기술, 액추에이터 재료 및 디바이스 기술 그리

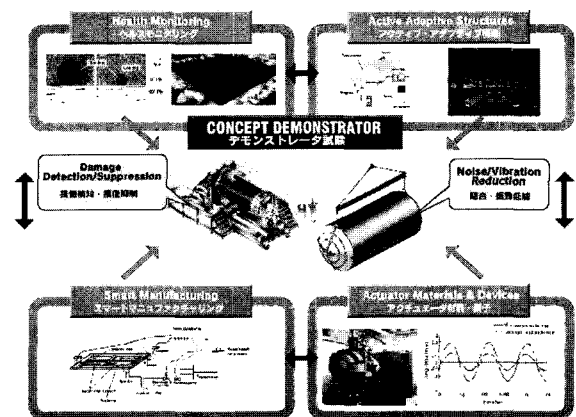


그림 5 Smart Material and Structure System 기술의 개념

고 개념 증명의 5개 기술로 이루어져 있다. 국내 ERC로서 스마트 사회기반시설 연구센터는 2002년부터 대형구조물의 이상상태 모니터링과 안전성 및 사용성의 증대를 위한 국내의 연구개발 활동의 촉진과 특히 최근 선진국에서 집중 연구되고 있는 스마트 센서, 스마트 재료, 모니터링, 제어 및 보강기술을 대형 사회기반구조물에 응용하는데 필요한 기술개발에 주력하고 있다.

#### 4. 지능재료/지능구조물 기술의 응용분야

지능 재료/지능구조물 센서 및 액추에이터의 다양한 기능을 제어 및 신호처리 기능과 함께 시스템에 통합하는 차세대 신기술로서 시스템에 적응성을 부여하면서 소형화, 경량화 및 민첩성을 확보하는 중요한 기술이다. 본 기술은 다음과 같은 분야에 매우 중요한 역할을 담당하고 있다.

- ▶ 능동 소음 및 반능동 진동제어 : 산업, 소모품, 항공, 교통, 운송 분야에 실제적으로 응용되며, 산업용 송풍기 소음저감, 생산 시설이나 TV 카메라의 진동저감, 냉장고 소음저감, 후드팬 소음저감, 항공기실내 소음저감, 엔진 진동저감, 디젤엔진 배기 소음저감, 트럭운전석 진동차단, 고속전철용 반능동 현가장치, 능동팬토그램, 능동소음저감장치 등 다양한 응용 제품이 있다. 일부 상용화 제품이 나오고 있으며, 새로운 시장 형성 가능성이 매우 높다.
- ▶ 건전성 평가시스템 : 복합 재료 손상위치 탐지시스템, 손상구조 건전성 평가시스템, 교량, 저장탱크, 건물, 유조선, 대형 구조물의 광섬유 센서시스템 등이 있다. 가격과 복잡성으로 인해 시장 형성이 느려지고 있으나 시대가 변함에 따라 필요성이 점점 높아지고 있다.
- ▶ 모터/액추에이터 : 초정밀 직진 안내기구, 나노 스테이지, 절삭오차 보정용 액추에이터, 초음파 회전모터, 지능유압 서보밸브, 변형 거울, 광쌍안정소자, 고감도 광간섭계, AC팽창계, 지능 VTR헤드, 프린터헤드 등이 있다. EAP(Electro-Active Polymer)와 같은 인공 근육은 로봇, 의료, 오락, 영화 산업에 새롭게 응용되고 있으며 그 잠재 가능성이 매우 높다.
- ▶ 지능 MEMS/NEMS : 자동차 엔진 성능제어, 흡배기구 압력측정, 가속도 센서, 자이로센서, 에어백 센서, 타이어 센서 등의 세계시장이 2000년에는 8억불

에 달하며 시장 성장률이 15%에 이르고 있다. 일회용 혈압계 역시 4천만불의 시장에 이르고 있는데, 높은 판매량, 높은 시장 형성률, 그리고 대형 시장으로의 발전 가능성이 새로운 시장 형성을 가능케 하고 있다.

- ▶ 지능 window/display : 전기의 인가에 따라 색상이나 빛의 차단도가 달라지는 지능 window, 미소각도 조정 display, 바이오프 display 등이 있다. 건물, 자동차의 유리창을 비롯해 가전제품부터 항공에 이르는 정보 display 장치들은 수십 억 원의 시장을 놓고 경쟁하고 있다.
- ▶ 보안 시스템 : electronic article 경찰, 도서태그, 비접촉 항공 운송물 분류 및 보안시스템, 전자 운전자 식별 시스템, 광섬유 건물 보안 시스템, 지능 신경망 형상 인식 시스템 등이 있으며, 전자운전자 식별 칩의 경우 1억불의 매출이 Texas Inst.에 의해 창출되기도 하였다. 보안 시스템의 높은 판매고로 인해 새로운 기술 시장의 가능성이 매우 높다.
- ▶ 형상 제어 : 지능항공기 구조물, 인공위성안테나, 헬리콥터 회전익 등이 연구되고 있는 단계이며 시장형성은 군사목적의 특성과 기술의 안전성으로 인해 느린 상태이다.
- ▶ 실시간 모니터링 시스템 : 주행 시 철도 차량의 차륜 모니터링은 탈선방지, 주행 안전성과 유지 보수 면에서 필요하다. 압전재료를 이용한 변형센서 또는 AE 센서 유닛 그리고, RF MEMS 센서를 차륜에 설치하여 원격감지를 하거나 혹은 비접촉식 센서를 사용하여 차륜의 건전성을 평가할 수 있다.
- ▶ 충돌방지 시스템 : 철도와 같은 기반시설의 운전 중 일어날 수 있는 급박한 상황에 대처할 수 있는 장치는 철도차량의 안전유지 및 재난을 방지하는데 매우 중요하다. 음파 또는 전파를 이용하면 전방에서 접근하는 물체를 인식하여 충돌을 경고하는 시스템을 구축할 수 있다. 또한 대구 지하철과 같이 전방에 자연재해가 발생하였을 때 이를 감지할 수 있는 능력은 재난방지에 필요하다.
- ▶ 교량, 도로, 철도 건전성 평가 시스템 : 자연재해나 테러의 공격 또는 유지보수문제로 인해 교량, 도로, 철도에 이상이 생겼을 때 이를 차량에서 즉시 감지하는 것은 재난방지에 매우 중요한 단서를 제공한다. 지능재료를 이용한 센서를 이용한다면 건전성을 차량에서 감지할 수 있는 시스템을 개발할 수 있다.

5. 지능재료/지능구조물 기술의 연구동향

최근 지능재료를 이용한 디바이스에 대한 연구가 전세계적으로 활발히 진행되고 있으며 이는 새롭게 창출된 연구개발 분야이다. 지능재료를 이용한 관련기술은 기계, 제어, 전기, 재료 등 여러 산업분야의 전문기술과 밀접한 연관관계를 갖고 있어 여러 민간산업과 방위산업분야측면에서 막대한 기술적, 경제적 파급효과를 갖고 있는 고부가가치의 기술이다. 또한 지능재료를 이용한 디바이스관련 기술은 매우 독창적인 것으로 기존 기술과는 전혀 다른 원리와 작동메카니즘을 갖는 차세대 첨단기술이다. 이와 같이 본 연구에서 제안된 지능재료를 이용한 디바이스관련 기술은 여러 산업분야에 공통으로 적용될 수 있는 중요한 핵심기반기술이며, 광범위한 영역에서의 무한한 응용과 활용이 현재와 가까운 장래에 기대되는 기술로서 이에 대한 시급한 국내 기술기반구축이 절실히 요구된다.

지금까지의 연구가 지능구조물시스템의 개념을 증명하는 단계이었다고 한다면 최근의 연구는 나노기술과 접목하여 재료 단계부터 설계하여 디바이스의 개발로 나아가거나, 반대로 디바이스의 성능으로부터 요구되는 재료를 설계하는 방식의 연구가 추진되고 있다. MEMS/NEMS 기술 및 이들을 통합하여 시스템을 구축하는 기술들, 예를 들면 polymer나 금속을 혼용한 삼차원 MEMS/NEMS 기술을 사용한 Smart Sensor 및 이들이 통합된 분산센서 시스템, 재해방지 시스템, 파손 예방 시스템 등이 최근 연구되고 있다. 한편 액추에이터 및 모터와 같은 디바이스의 연구도 매우 활발하다. 디바이스의 응용은 종래의 기술을 개선하는 한계에서 벗어나 새로운 개념의 응용을 창출하고 있다. 지능재료시스템 기술의 최근 개발동향은 시스템의 통합화, 독립화, 경량화, 소형화, 그리고 네트워크화라고 할 수 있다. 지능재료의 연구 단계를 살펴보면, 주로 응용연구 및 개발연구가 주류를 이루고 있으며 연구주체를 보면, 응용 연구는 주로 학교에서, 개발연구는 주로 회사에서 하며 연구소는 두 가지를 모두 참여하는 방식을 취하고 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 지능재료 및 지능구조물 기술과 국내의 적용 예 그리고 향후 적용할 수 있는 분야들을 소개하였다. 토목, 항공, 선박, 해양과 같은 시스템 기술과

기계, 재료, 전기, 전자, 컴퓨터와 같은 기반 기술이 학제적으로 접목된다면 타 분야에 파급효과가 큰 지능재료/지능구조물 분야에 국제적인 경쟁력을 갖춘 우수한 연구결과를 창출하여 국가산업의 발전에 이바지 할 수 있을 것이다. 지능 재료 관련 기술은 무한한 잠재력을 갖고 있는 21세기 새로운 차원의 기술로서 평가되고 있기 때문에 관련 기술의 국제적 경쟁력 확보와 기술우위 선점을 위해 조속한 시일 내에 대형국책 연구사업으로서의 추진이 반드시 필요하다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. C. A. Rogers, "Intelligent Material Systems - The Dawn of a New Materials Age," *J. of Intelligent Material Systems & Structures*, Vol. 4, 1993, pp. 4~12
2. W. B. Spillman, Jr., J. S. Sirkis and P. T. Gardiner, "Smart Materials and Structures: What are they?," *Smart Materials & Structures*, Vol. 5, 1996, pp.247~254
3. K. Uchino, *Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors*, Kluwer Academic Publishers, 1997
4. 김재환, "압전지능 구조물의 원리와 소음 제어에의 응용," 한국소음진동공학회지, 제6권, 제3호, 1996, pp. 267~273
5. 김재환, 이현일, "Terfenol-D 작동기를 이용한 초정밀 스텝모터의 성능평가," 한국정밀공학회지, Vol. 17, No. 2, 2000, 2, pp.220~226
6. W. H. Winslow, "Induced Fibrillation Suspensions," *Journal of Applied Physics*, Vol. 20, 1949, pp.1137~1140
7. W. A. Bullough, "Miscellaneous Electrorheological Phenomena Part I," *Proceedings of the 2nd Conference on ER Fluids*, 1989, pp.115~123
8. 최승복, 박용균, "전기유동유체를 이용한 지능구조물 시스템의 구성 및 응용," 한국소음진동공학회지, 제5권, 제3호, 1995, pp.275~283
9. Y. Bar-Cohen, Ed., "Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles: Reality, Potential, and Challenger," SPIE Press, 2001
10. W. P. Mason, "Piezoelectricity, its history and applications," *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 70, No. 6, 1981, pp.1561~1566



11. G. M. Sessler, "Piezoelectricity in polyvinylidene flouride," *J. Acoust. Soc Am.*, Vol. 70, No. 6, 1981, pp.1596~1608
12. T. Bailey and Jr. J. E. Hubbard, "Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam," *J. of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 8, No. 5, 1985, pp.605~611
13. Tomikawa Y., Ogasawara T. and Takano T., "Ultrasonic motors-constructions/characteristics/applications," *Ferroelectrics*, Vol. 91, pp.163~178, 1989
14. Toda K. Matsuyama K. and Takamori M., "Micro-pipetting device operating under surface vibration motion of piezoelectric ceramic vibrator," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 63, No. 9, pp.4225~4226
15. Howald L. Rudin H. and Guntherodt H.-J., "Piezoelectric inertial stepping motor with spherical rotor," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 63, No. 8, 1992, pp.3909~3912
16. J. R. Pratt, S. S. Oueini and A. H. Nayfeh, "A Terfenol-D Nonlinear Vibration Absorber," *Proceedings of '97 SPIE Conference*, Vol. 3041, 1997, pp. 56~66
17. M. Anjanappa and Y. Wu, "Magnetostrictive Particulate Actuators: Configuration, Modeling, and Characterization," *Smart Materials and Structures*, Vol. 6, 1997, pp.393~402
18. D. Liu, J. W. Sutherland, K. S. Moon, T. J. Sturos and A. R. Kashani, "Surface Texture Improvement in the Turning Process Via Application of a Magnetostrictively Actuated Tool Holder," *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 120, 1998, pp.193~199
19. S. B. Choi, C. C. Cheong and C. H. Lee, "Position Tracking Control of a Smart Flexible Structure Featuring a Piezofilm Actuator," *AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 19, No. 6, 1996, pp.1364~1369
20. J. Kim, B. Ko, "Optimal design of Piezoelectric smart structure for noise control," *Smart Materials and Structures*, Vol. 7, No. 6, 1998, pp.801~808
21. 황우석, 황운봉, 한경섭, 박현철, "압전재료를 이용한 복합재료 보의 능동 및 수동제어," *대한기계학회논문집*, Vol. 17, No. 3, 1993, pp.485~491
22. 이영재, 윤광준, "복합재료 외팔보의 비선형 진동 추정," *한국항공우주학회지*, Vol. 23, No. 3, 1995, pp. 71~79
23. 류근호, 한재홍, 이인, "압전 감지기/작동기를 이용한 복합재 평판의 최적 진동제어 실험," *한국소음진동공학회지*, Vol. 7, No. 1, 1997, pp.161~168
24. 유정규, 박근영, 김승조, "분포형 압전필름 감지기와 압전세라믹 작동기를 이용한 보의 진동 제어," *한국소음진동공학회지*, Vol. 7, No. 6, 1997, pp.996~974
25. 신성수, 류영수, 김유만, 1996, 압전초음파모터의 제작 및 평가장치 개발, *한국음향학회지*, 제15권, 제1호, pp.10~16
26. Jaehwan Kim, J.-D. Kim, S.-B. Choi, "A hybrid inchworm linear motor," *Mechatronics*, Vol. 12, No. 4, 2002, pp.525~542
27. J. Kim and B.Y Kang "Performance Test and Improvement of Piezoelectric Torsional Actuator," *Smart Materials and Structures*, Vol. 10, No. 4, 2001, pp.750~757
28. B. Kang, J. Kim, K.-Y. Choi and H.-M. Kim, "Nano-linear motor based on self-moving cell concept," *8th International Conference on New Actuators*, Bremen, Germany, 2002, pp.672~675
29. 정희원, 압전소자 구동기의 이력과 크립현상의 분석 및 응용에 관한 연구, *한국과학기술원, 박사학위논문*, 2000
30. H. Jeong and K. Park, "Active Vibration Suppression Using a Magnetostrictive Material," *Proceedings of Asia-Pacific Vibration Conference '97*, November 9-13, Kyongju, Korea, 1997, pp.1182~1187
31. 서문석, 최승복, 여문수, "ER유체기술관련 선진연구기관방문을 마치고," *자동차공학회지*, Vol. 16, No. 5, 1994, pp.47~56
32. N. K. Petek, "An Electronically Controlled Shock Absorber as an Application of Electrorheological Fluid," *SAE Technical Paper Series 920275*, 1992
33. N. K. Petek, R. J. Goudie, and F. P. Boyle, "Actively Controlled Damping in Electrorheological Fluid-Filled Engine Mounts," *SAE Technical Paper Series 881785*, 1988
34. Lord Corporation's WWW Home Page for Rheonetic

- Magneto-Rheological Fluid Technology, <http://www.webcom.com/mrfluid/>
35. G. M. Kamath and N. M. Wereley, "Nonlinear Viscoelastic-Plastic Mechanisms-Based Model of an Electrorheological Damper," *AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 20, No. 6, 1997, pp.1125~1132
  36. H. Block, J. P. Kelly, "Electro-Rheology," *Journal of Physics D:Applied Physics*, Vol. 21, 1988, pp. 1661~1678
  37. N. G. Stevens, J. L. Sproston and R. Stanway, "An Experimental Study of Electro-Rheological Torque Transmission," *ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, Vol. 110, 1988, pp.182~188
  38. E. W. Williams, S. G. Rigby, J. L. Sproston and R. Stanway, "Electrorheological Fluids Applied to An Automotive Engine Mount," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 47, 1993, pp.221~238
  39. S. Morishita and J. Mitsui, "An Electronically Controlled Engine Mount Using Electro-Rheological Fluid," SAE Technical Paper Series 922290, 1992
  40. T. Ushijima, K. Takano and H. Kojima, "High Performance Hydraulic Mount for Improving Vehicle Noise and Vibration," SAE Technical Paper Series 880073, 1988
  41. 최승복, 최영태, 박우철, 정재천, 서문석, 여문수, "연속가변 ER댐퍼의 제어 및 응답특성," 한국자동차공학회논문집, 제4권, 제6호, 1996, pp.52~64
  42. 홍성룡, ER 및 MR클러치의 성능비교, 인하대학교 기계공학과 석사학위논문, 1999
  43. Q. M. Zhang, V. Bharti and X. Zhao, "Giant Electrostriction and Relaxer Ferroelectric Behavior in Electron-Irradiated Poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) Copolymer," *Science*, Vol. 280, 1998, pp. 2101~2104
  44. R. E. Pelrine, R. D. Kornbluh and J. P. Joseph, "Electrostriction of polymer dielectric with compliant electrodes as means of actuating," *Sensors & Actuator*, A64, 1998, pp.77~85
  45. R. Heydt, R. Pelrine, J. Joseph, J. Eckerle and R. Kornbluh, "Acoustical performance of an electrostrictive polymer film loudspeaker," *J. Acoust. Soc. Am*, Vol. 107, 2000, pp.833~839
  46. P. Calvert and Z. Liu, "Free form Fabrication of Hydrogels," *Acta Materialia*, Vol. 46, 1998, pp. 2565~2571
  47. T. Hirai, M. Watanabe and M. Yamaguchi, "PVC Gel Deforms like a Tongue by Applying on Electric Field," *Worldwide ElectroActive Polymers Newsletter*, Y. Bar-cohen Ed., Vol. 1, No. 2, 1999, pp.7~8
  48. M. Otake, Y. Kagami, K. Ishikawa, M. Inaba and H. Inoue, "Shape design of electroactive polymer gel," *SPIE's 2000 Symposium on Smart Materials & MEMS*, Vol. 4234, Melbourne, Australia, 2000
  49. M. Zrinyi, L. Barsi, and A. Buki, "Ferrogel: a new magneto-controlled elastic medium," *Polymer Gels and Networks*, Vol. 5, No. 5, 1997, pp.415~427
  50. K. Ramanathan, B. Zhu, W. Chang, V. V. Varadan, V. K. Varadan "Active and Passive noise control using electro-active polymer actuator(EAPA)," *SPIE's 6th Annual Symp. on Smart Structures and Materials*, Vol. 3668, Newport Beach, CA, USA, March 1999
  51. M. Shahinpoor, Y. Bar-Cohen, J. O. Simson and J. Smith, "Ionic polymer-metal composites(IPMCs) as biomimetic sensors, actuators and artificial muscles-a review," *Smart Materials & Structures*, Vol. 7, R15-R30, 1998
  52. K. Oguro, N. Fujiwara, K. Asaka, K. Onishi and S. Sewa, "Polymer Electrolyte Actuator with Gold Electrodes," *SPIE's 6th Annual Symp. on Smart Structures & Materials*, Vol. 3669, Newport Beach, CA, USA, 1999
  53. M. Konyo, S. Tadokoro, T. Takamori and K. Oguro, "Artificial Tactile Feel Display Using Soft Fel Actuators," *Proc, IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, 2000, pp. 3416~3421
  54. M. Shahinpoor, H. B. Schreyer and K. J. Kim, "Artificial sarcomere and muscle made with conductive polyacrylonitrile(C-PAN) fiber bundles," *SPIE's 7th Annual Symp. on Smart Structures & Materials*, Vol. 3987, Newport Beach, CA, USA, 2000

55. J. N. Barisci, T. W. Lewis, G. M. Spinks, C. O. Too and G. G. Wallace, "Responsive System based on conducting polymers," *Proc. on Smart Materials, Structures, and Integrated Systems (SPIE)*, Vol. 3241, pp.10~19, Adelaide, Australia, 1997
56. T. F. Otero, M.-T. Cortes, "Triple layer artificial muscles: actuator and sensor," *Worldwide Electro-Active Polymers Newsletter*, Y. Bar-cohen Ed., Vol. 2, No. 2, 2000, pp.7~8
57. E. W. H. Jager, O. Inganas and I. Lundstorm, "Microrobots for Micrometer-size object in Aqueous Media : Potential tools for Single cell manipulation," *Science*, Vol. 288, 2000, pp.2335~2338
58. R. H. Baughman, C. Cui, A. A. Zakhidov, Z. Iqbal, J. N. Barisci, G.M. Spinks, G. G. Wallace, A. Mazzoldi, D. D. Rossi. A. G. Rinzler, O. Jaschinski, S. and Roth, M. Kertesz, "Carbon Nanotube Actuators," *Science* Vol. 284, 1999, pp. 1340~1344
59. M. Gao, S. Huang, L. Dai, G. Wallace, R. Gao and Z. Wag, "Aligned Coaxial Nanowires of Carbon Nanotube Sheathered with Conducting Polymers," *Angewandte Chemie Int. Ed. Vol. 39, No. 20, 2000, pp.3664~3667*
60. J. Kim and Y.B. Seo, "Electro-Active Paper Actuators," *Smart Materials and Structures*, Vol. 11, No. 3, 2002, pp.355~360
61. G. Wallace, G. Spinks, J. Wu and D. Zhou, "Electrofunctional materials: Strain gauges and actuators in fabric structures," *SPIE's 2000 Symposium on Smart Materials & MEMS*, Vol. 4234, Melbourne, Australia, 2000
62. S. K. Lee, Y Choi, S. S. Yang, J. J. Pak, "Fabrication of electroactive polymer actuator composed of polypyrrole and solid-polymer electrolyte and its application to micro pump," *SPIE's 7th Annual Symp. on Smart Structures & Materials*, Vol. 3987, Newport Beach, CA, USA, 2000 