

스마트 재료 및 구조물

— 신생하는 첨단기술 —



●1955년생
●스마트 재료 및 구조물 이용 로봇, 자동차부품, 대형우주구조물 각종 제혁기기등의 설계 및 제어 메카니즘 연구에 관심을 가지고 있다.

최 승 복

한국기계연구소 로봇공학실

1. 머리말

역사가들이 인류문명을 몇 개의 뚜렷한 재료 시대(material age)로 분류하듯이 재료에 대한 기술개발과 연구는 인류발전에 심오한 영향을 주어오고 있다. 보다 나은 삶에 대한 인간의 근본적인 욕구와 특히 산업 및 군사적 측면에서의 보다 우수한 품질 개발에 대한 의욕은 21세기를 얼마 남겨 놓지 않은 현시점에서 가일층 고조되고 있음이 확연하다. 이에 부응하여 최첨단 기술을 비롯 몇몇 선진국에서는 신생하는 최첨단 기술의 하나로 소위 스마트 재료 및 구조물 SMS(smart materials and structures)에 대한 연구가 활발히 진행중이다. 새로운 차원의 최첨단 SMS 기술은 현재 우리나라 핵심기술로 책정되어 집중 연구개발되고 있는 신소재기술, 메카트로닉스기술, 생명공학기술, 인공지능기술 및 우주항공기술등의 결합에 의한 통합기술성격을 갖고 있기 때문에 그 기대효과는 지대하다고 하겠다. SMS 시스템은 기존의 재료 및 구조물이 보유하고 있는 근육계(muscle system)에 감지하고 생각할 수 있는 신경계(nervous system) 및 두뇌계(brain system)를 제공하여 형성하게 도며, 따라서 이는 조그만 마이크로 칩이 우리 생활에 혁신을 가져온 것 이상으로 우리 생활의 모든면에 많은 변화를 가져오리라 기대된다.

재료와 구조물에 형용사로서 “smart”라는 용어가 문헌상에 나타나기 시작한 것은 약 3년 전이나, 이 용어를 쓰는 사람들은 자기 나름대로의 해석을 하고 정의하여 사용하기 때문에 공통된 개념과 정의가 형성되어 있지 않은 실정이다. 이 “smart”라는 용어는 센싱, 액츄에이팅, 제어, 학습(learning), 계산등의 능력 그리고 적절한 소프트웨어 및 하드웨어를 보유하고 있는 재료와 구조물을 표현 혹은 분류하기 위해 사용해진 많은 형용사중의 하나에 불과하다. 사실 어떠한 특정 재료 혹은 구조물을 smart, intelligent, sense-able 혹은 ‘adaptive’라고 분류하느냐 하는 문제에 대해서는 의견이 분분하다. 형상기억 합금에 이러한 부류의 형용사 적절하게 부여되고 있는데 그 이유는 잘 알려진 바와 같이 합금자체가 특정한 형상을 기억했다가 적절한 열의 고급으로 기억된 본래의 형상을 다시 얻을 수 있기 때문이다. ER 유체(electro-rheological fluid)는 필요에 따라 액체 또는 고체가 될 수 있기 때문에 adaptive라는 이름이 주어지고 있고, 압전필름(piezofilm)은 기존의 구조물과 결합하여 폴리머의 극전화 현상을 통한 센싱과 액츄에이팅 능력을 보유하고 있기 때문에 “smart”라는 이름이 주어졌으며, 광섬유는 SMS 구성에 있어서 가장 유망한 센서 매체로서 대두되고 있기 때문에 “smart”라는 용어가 주어지고 있다.

이러한 용어정의적인 관점에서 볼 때 현재

일반적으로 인식되고 있는 SMS의 정의를 내린다면 SMS란 재료자체 혹은 현존하는 구조재료와 결합한 것으로 재료자체가 센싱, 액츄에이팅, 제어, 학습, 계산등의 능력을 보유한 것을 말한다. 재료의 점성, 강도등 기계적 및 물리적 성질이 외부의 전압, 열 혹은 빛등에 의해 감지 및 제어되며 그 반응속도는 천분의 1초 이하로 매우 빠르다. 따라서 SMS는 하중 또는 예측하기 힘든 외부 환경조건 변화에 대해 재료자체 고유의 지능으로 유효 적절히 대처할 수 있는 기능을 보유하고 있다. 그리고 센서, 액츄에이터 등 각 구성요소적인 측면에서 알려진 SMS의 공통된 특징을 살펴보면 다음과 같다.

- 센서 : 응력, 변형, 전압등과 같은 외·내부의 자극변화 가지 및 측정등을 할 수 있도록 SMS는 재료 자체 혹은 삽입(embedded)된 센싱 능력을 보유한다.

- 액츄에이터 : SMS는 외·내부의 자극변화에 유효 적절히 대응하기 위한 재료자체 혹은 삽입된 액츄에이팅 능력을 보유한다.

- 제어메카니즘 : SMS는 정확한 시스템 파악과 적절한 반응의 선택으로 외·내부 변화에 대해 제어할 수 있는 메카니즘을 보유한다.

- 반응속도 : SMS는 외·내부 변화에 대해 빠른 속도로 반응하여 효과적인 결과를 가져오며 외·내부 변화 제거시 가능한한 빨리 본래의 상태로 복귀한다.

이러한 특징을 보유하고 있는 SMS의 연구는 약 3~4년전부터 미국, 영국, 일본등에서 몇몇 연구가들에 의해 산발적으로 진행되어 오다가 지난 1988년말 미국 육군성에서 주체한 SMS에 관한 워크숍을 계기로 실질적인 연구기반이 이룩되었고 새로운 학문의 하나로 자리를 잡게 되었다⁽¹⁾. SMS에 관한 전문 국제 저널도 1990년초에 창간을 보게 되어 이 분야 연구의 질과 내용이 급상승 하고 있으며 체계화되어 가고 있다. 따라서 본 글에서는 새로운 세기, 새로운 차원의 첨단기술의 하나로 자리를 굳혀가고 있는 SMS에 관한 연구의 필요성

과 세계동향을 살펴본 후 SMS 부류에 속하고 있는 ER 유체와 압전필름의 이론적 배경 및 잠재적 응용성에 대해 살펴보고자 한다.

2. 연구의 필요성 및 세계 동향

SMS 연구의 필요성은 우리나라 첨단국책과제로 선정되어 활발히 연구되고 있는 신소재기술, 생명공학기술, 메카트로닉스 기술, 인공지능기술 등과 더불어 인류의 보다 나은 삶에 대한 근본적인 욕구에 부합하기 위해 급격히 증가하고 있다. 예를 들어, 노면상태 혹은 기타 외부의 어떠한 조건에서도 전혀 진동과 소음이 없는 자동차의 출현이나, 지진의 영향에도 견고히 견딜 수 있는 스마트 빌딩의 출현등을 인류복지 향상에 가일층 혁신을 가져올 것이다. SMS와 관련한 기술 분야는 자동차산업, 우주항공산업, 국방산업, 의료기산업, 제조 및 산업기계, 소비성 및 스포츠용품, 정밀 전자기기 그리고 건설산업 분야에 이르기까지 매우 광범위하다. 이들 각 분야에 있어서 구체적인 응용장치는 표 1에서 보는 바와 같이 실시간 동특성 제어형 테니스 라켓에서부터 고유진동수 제어형 스마트 항공기 날개에 이르기까지 매우 다양하다. 이들 구체적인 응용장치의 실현은 상당한 기간과 노력의 뒷받침이 따라야 함은 물론 경제적인 측면에서도 상당한 투자를 필요로 할 것이다. 현재 선진국의 전반적인 SMS 연구현황을 보면 자동차 산업 및 우주항공산업 분야에서 가장 활발히 진행되고 있으며 최근들어 SMS 관련 각종 제조산업분야에 대한 연구개발비 투자도 급격히 증가되고 있는 추세다.

미국에서는 약 3년전부터 국방성 및 NASA의 주관하에 몇몇 대학 및 전문연구기관에서 SMS 및 응용장치 개발에 연간 5천만불 이상을 투자해 오고 있다. 그 예로서 Michigan 주립대학교에서는 ER 유체 이용 지능구조물(smart structure)개발을, 그리고 Virginia 공과 주립대학에서는 압전필름, 형상기억합금 및 광섬유 이용 대형 지능우주구조물 개발을 추진

표 1 SMS 관련 기술

자동차산업	엔진마운트, 능동제어형 현수장치, 조향시스템, 속도서버, 스마트 윈드 쉴드, 스마트벌브, 각종 밸브, 에티록 브레이크시스템, 펌프, 액츄에이터, 스프링, 클러치 및 트랜스미션 시스템
항공우주산업	스마트 항공기 날개, 위상제어형 스마트스킨, 우주로봇, 전자기판, 스마트 운반대, 랜딩기어, 진동억제시스템, 스마트 유압시스템, 스마트 로터 크레프트 시스템, 대형우주구조물
국방산업	잠수함, 초계정, 스마트 방호복, 스마트 전장 로봇, 무기공급시스템, 각종자동스위치, 가변레이다 장치, 음향감쇠어뢰 추진장치, 탱크현수장치, 각종유압밸브 시스템, 원격조정전자시스템
제조 및 산업기계	능동밸런스시스템, 소음감소기, 방직기계, 농기계 복사기, 산업용 지능로봇팔, 조인트 액츄에이터, 물자수송기기, 석유 및 광산 탐사 장비, 스마트 유연치공구 시스템
가정 및 스포츠용품	스키, 테니스라켓, 골프채, 낚시대, 야구배트, 진공청소기, 스마트 세탁기, 눈자동차, 잔디깎는기계, 스마트테이블 및 의자
토목 및 건설	스마트빌딩, 스마트 엘리베이터, 스마트 교량, 스마트 댐, 스마트 벽, 스마트 창문

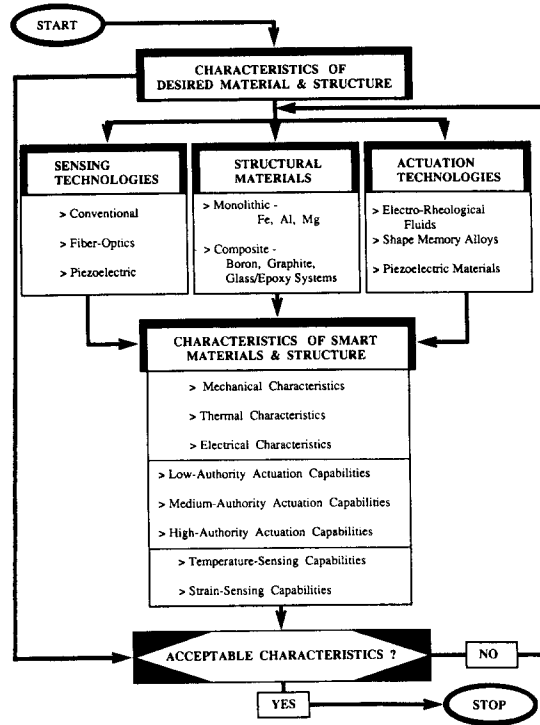


그림 1 지능구조물의 구성

하고 있다. 이 지능구조물 조성에 대한 일반적인 방법은 그림 1에 잘 나타나 있다. 지능구조물의 최적 조성을 위해서는 요구하는 최종 성능특성에 부합하도록 알루미늄 혹은 압전필름과 같은 센싱 및 액츄에이팅 재료가 보유하고 있는 고유의 기계적 및 전기적 특성 파악이 전제되어야 하며 여러 수준의 제어 및 센싱 능력 또한 확보되어야 한다. 한편 미국의 GM사, Ford사, Lord사 등에서는 ER 유체를 이용한 자동차 클러치 시스템, 실시간 진동 제어형 엔진마운트, 능동제어형 댐퍼 및 속도서버등의 개발에 지난 2년전부터 연간 4천만불 이상을 투자하여 활발한 연구가 추진중인데 아직 상품화 단계는 아니며 실험모델을 통한 성능시험을 하고 있다. 그리고 미국 McDonnell

Douglas사를 비롯 여러 항공산업 관련사에서 지난해 부터 ER 유체, 압전필름 및 광섬유를 이용한 기능 항공기 날개, 가변 레이다 장치, 헬기 블레이드등의 개발을 추진해오고 있다.

SMS에 대한 영국의 개발현황을 보면 주요 학계에서 ER 유체조성과 이를 이용한 응용장치 개발에 많은 힘을 기울이고 있다. Cranfield 공대에서는 다양한 ER 유체개발과 유체의 화학적 및 물리적 특성 연구에 주력하고 있으며 Sheffield 대학교에서는 ER 유체이용 산업용 로봇의 엘보우 조인트, 각종 밸브 및 액츄에이터 개발에 많은 투자를 하고 있다. 현재 ER 유체와 관련한 기술분야의 연구는 영국이 선도적 역할을 하고 있으며 최근들어 정부를 비롯 여러 사기업에서도 많은 투자를 하여 심도있는 연구를 추진중에 있다. 그리고 Kent

대학교 등에서는 광섬유를 이용 지능구조물의 진동측정에 관한 연구를 활발히 하고 있다. 소련 또한 ER 유체 이용 모니터형 장치, 능동제어형 디스트리뷰터(distributor), 안전밸브, 호전형 점도계등 다양한 장치개발에 많은 연구를 하고 있다. 한편 일본의 경우 SMS 분야 연구가 활발히 진행되고 있는 것은 확실하나 기술개발의 특허화와 자신들의 연구결과 노출금지를 위해 정보비밀에 신경을 쓰기 때문에 구체적인 진행과정이나 연구 깊이등을 잘 알려지지 않은 실정이다. 몇몇 대학에서 수행하고 있는 형상기억합금 이용 로봇 액츄에이터 개발, 압전필름이용 초정밀 위치제어 및 접촉센서개발등이 일부 문헌상에 나타나 있다. 이 밖에 독일 및 스웨덴 등에서도 SMS에 대한 본격적인 연구개발 착수를 위해 지난 2년여전부터 정부 주도하의 정확한 자료수집 및 분석을 통해 연구 방향설정을 추진하고 있는 중이다.

이와 같이 SMS에 대한 개발연구는 이미 미국, 영국등에서 시작되어 세계적인 차원으로 확산되어 가고 있는 중이므로 이에 이 분야 기술이 전무 혹은 미약한 국내에서도 신속한 자료수집 및 시장성조사와 더불어 정부주도하에 합리적이고 단계적인 기술개발이 절실하다고 판단된다. 따라서 SMS 연구와 관련한 최첨단 기술의 국내 기반구축 및 자립조성 그리고 기계, 전자, 물리, 화학 재료과학 등의 통합기술 확립으로 기술적 효과는 물론 최첨단 방위 산업 기술혁신을 통한 전략적 효과를 기대해야 한다고 본다. 그리고 더 나아가서, 2000년경 예상되는 3천억불 이상의 거대시장 점유를 통한 경제적 효과 및 SMS 기술의 세계 상위권 진입을 통한 사회적 효과도 무시할 수 없을 것으로 사료된다.

3. 이론적 배경

3.1 ER 유체

1947년 미국의 W. Winslow는 미세한 고체

입자인 녹말가루와 광물성 기름을 혼합하여 만든 불용해성의 유체에 약 3 kV/mm의 전장(electric field) 부하시 유체 저항의 현저한 증가 현상이 나타남을 보고했다⁽²⁾. 그는 부하된 전장이 유체의 점성을 증가 시킨다고 가정했고 따라서 그 물질을 electroviscous fluid라고 이름 지었다. 그러한 유체의 잠재적 가치는 즉시 인식되었고 많은 회사들이 Winslow가 보고한 물질 중에서 가장 효과가 좋은 실리카젤형의 유체를 이용 진동기(vibrator) 및 가변 제어형 댐퍼 개발을 시도했다. 그러나 실리카젤형의 큰 마멸성 때문에 의욕에 넘치던 모든 시도는 수포로 돌아갔으며, 1980년경 영국에서 이 유체에 대한 연구가 다시 시작될 때까지 이 분야에 대한 연구 흥미도는 매우 취약했다.

초기 이 유체에 대한 해석은 유체에 전장 부하시 일어나는 유동변화(rheological change)의 이해부족으로 많은 문제점을 던져 주었다. 예를 들어 전장부하에 의해 유체의 점성 변화만이 발생한다는 생각은 잘못된 인식이었다. 일반적으로 전장의 무부하시 두 판사이의 ER 유체는 일반 기름과 매우 흡사한 운동을 하나 전압이 부하되면 그 운동은 건조한 판에서 일어나는현상과 같다. 즉 건조한 두 판을 누르는 힘의 증가에 따라 마찰력이 증가하는 것과 같은 두 판 사이의 전압 부하 증가에 따라 운동을 시작하고 유지하기 위한 힘이 증가한다. 따라서 Winslow가 보고한 유체에 있어서의 유체 저항의 변화가 점성증가에만 있다고 한 가정은 잘못된 것이며 용어 또한 'electroviscous' 보다는 현재 널리 사용되고 있는 'electrorheological'이 더욱 적절한 표현이 된다.

ER 유체의 외면상 가장 두드러진 현상은 전장 무부하시 액체 상태가 전장 부하시 고체 상태로 변화하는 것이다. 그림 2는 전극(electrode)의 전하와 ER 유체입자의 전하 사이에 어떻게 해서 이러한 변화가 일어날 수 있는가를 보여 준다. 전장 무부하시에는 그림에서 보는 바와 같이 유체입자의 전하는 양극 혹은 음극이 될 수 있으며 자유로이 운동을 한다. 이

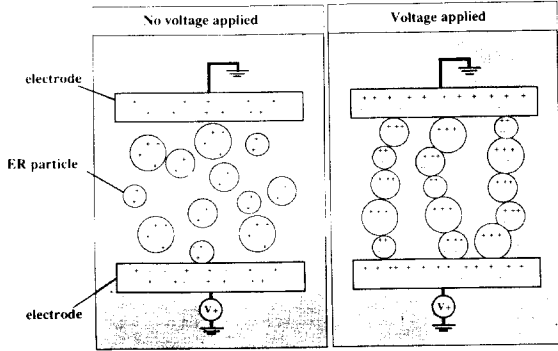


그림 2 전장에 대한 ER 유체의 반응효과

때 유체는 등방향(isotropic) 물리적 및 기계적 성질을 갖게 된다. 그러나 전장 부하시에는 유체입자의 전하는 체인형 구조를 형성하게 되며 이방향(anisotropic) 물리적 및 기계적 성질을 갖게 된다. 이 체인형 구조로 인해 유체의 운동이 제한되며 따라서 유체의 모든 유동 성질이 변화한다. 전장이 무부하 상태로 될 때 유체는 다시 본래의 랜덤(random) 구조를 갖게 된다. 일반적으로 ER 유체의 상변화(phase change)를 위해 요구되는 전장의 크기는 약 2~3 kV/mm(유체두께)이나 전류밀도(current density)가 약 10 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 이 하기 때문에 상변화를 위해 요구되는 전력은 매우 낮다. 그리고 전장에 대한 유체의 반응속도는 1 ms이하이며 최대 반응주파수는 약 12 kHz이다.

ER 유체가 전장에 의해 영향을 받기 위한 최소한의 기본조건으로는 ER 유체 조성시 사용되는 액체는 물을 싫어해 하며 고체입자는 적당한 양의 수분흡수를 위해 물을 좋아하고 다공성이어야 한다. 고체입자의 수분흡수는 거의 필수적이며 흡수된 양은 최종 유체 성질에 큰 영향을 준다. ER 유체에 있어서 고체입자의 기공사이에는 유동이온이 있으며 이 유동이온은 정상적인 방법으로 수분분자를 모은다. 전장이 유체에 부여될 때 이온은 수분을 수반하여 입장의 한쪽 끝으로 이동하며 따라서 수분 브리지(water bridge)를 형성하게 된다. 이

표 2 ER 유체의 성분

고체입자 (Dispersed phase)	기본액체 (Dispersant)	첨부제 (Additive)
알긴산	크실렌	수분
알긴산	바이페놀 (염화처리)	수분
카본	올리브 기름	수분 및 계면활성제
카본	광물성 기름	수분 및 계면활성제
셀룰로스	액체 파라핀	수성 암모니아
셀룰로스	실리콘 기름	염화물
실리카	등유	수분 및 비누
실리카	크실렌	수분
실리카	실리콘 기름	수분 및 계면활성제
녹말가루	올리브 기름	수분 및 소르비탄
녹말가루	와셀린	수분

이온화 입자는 비 이온화 입자보다 강한 ER 유체를 부여하게 되는데 예를 들어 알긴산(alginic acid)은 녹말가루보다 3배 이상 강한 효과를 낼 수 있다. 칼슘과 마그네슘 같은 매우 높은 전하밀도의 이온은 활발하지 못한 ER 유체를 부여하는데 그 이유는 이온들이 단단히 뭉쳐서 전장 부하시 이동할 수 없기 때문이다. ER 유체 메커니즘에 대한 기본이론과 화학적 및 물리적 요구에 대한 조사연구를 통해 많은 종류의 우수한 ER 유체가 조성되고 있다. 표 2는 지금까지 알려진 혹은 특허화된 몇몇 ER 유체의 성분을 나타낸다.

3.2 압전필름

ER 유체와는 달리 압전 소재(piezoelectric material)에 대한 연구는 그 역사가 길며 또한 문헌상에도 많이 나와 있다. 잘 알려진 바와 같이 약 100여년전 Jacques와 Curie는 quartz 크리스탈 변형시 전하(electrical charge)가 발생한다는 사실과 이와는 반대로 크리스탈 전장을 가했을 때 변형이 생긴다는 사실을 발견했

다. 그래서 그들은 이 현상을 **pressure electricity**를 뜻하는 그리스어인 **piezoelectricity** 즉 압전효과라고 불렀다. 그 이후 압전소재는 산업, 군사, 의료등 여러 분야에서 응용되어 왔으며 특히 제 2 차 세계대전을 전후로 MIT에서 개발한 세라믹 계통의 압전소재 출현을 계기로 **sonar**, 적외선 센서, 가속도 측정기, 마이크로폰등 그 응용범위는 급속히 확장되었다. 그러던 중 1960년대경 인간의 피부세포 조직과 뼈 같은 유기재료(**organic material**)에서도 압전효과가 나타난다는 놀라운 사실을 발견했으며 이는 사람의 피부가 물체에 접촉했을 때 피부에 가해진 압력 혹은 열을 전하로 바꾸어 뇌에 전달하므로써 물체에 대한 감각 인식을 할 수 있다는 사실로 대변된다. 일본의 H. Kawai는 유기재료의 일종인 폴리머(**polymer**)를 사용하여 필름형태의 압전소재인 PVDF(**polyvinylidene fluoride**)를 처음 개발했으며 이는 기존의 세라믹 계통의 압전소재에 비해 광범위한 사용주파수 영역($0.005 \text{ Hz} \sim 10^9 \text{ Hz}$), 광범위한 동적 사용범위($10^5 \text{ Pa} \sim 10^8 \text{ Pa}$), 높은 강도 및 충격저항($10^9 \text{ Pa} \sim 10^{10} \text{ Pa}$), 얇은 두께로 인한 유연성($6 \mu\text{m} \sim 110 \mu\text{m}$), 습도 및 화학물에 대한 높은 안정도, 높은 절연 강도($75 \text{ V}/\mu\text{m}$), 높은 출력 전압(세라믹에 비해 20배 이상), 낮은 음향 임피던스들과 같은 장점을 갖고 있다. 이러한 많은 장점을 갖고 있는 압전필름의 단점으로서 사용 온도 범위가 약 -40°C 에서 100°C 로써 보통 300°C 까지 사용할 수 있는 압전 세라믹보다 낮은 점이다. 또한 전자기(**electro-magnetic**)에 매우 민감하며 다른 압전소재와 마찬가지로 **d.c.** 측정이 불가능하다.

압전필름은 반복 $\text{CH}_2\text{-CF}_2$ 체인을 갖는 폴리머로서 알파, 베타 그리고 감사상(**phase**)을 갖는다. 압전효과 및 초전효과(**pyroelectricity**)를 얻기 위해서는 필름 제조중 베타상을 **poling**해야 하는데 **poling** 시간, 강도 및 온도 등에 의해 최종 성질이 결정된다. 그림 3에서 보는 바와 같이 이 **poling**을 통해서 폴리머 내

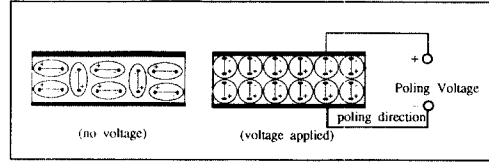


그림 3 압전필름의 극전화 현상

의 분자 쌍극자의 방향이 형성된다. 압전필름의 전극에 전압을 공급하면 전장의 극화(**polarity**)에 의해 인장 혹은 수축현상이 나타나며 또한 이와는 반대로 필름에 인장력 혹은 수축력을 가하면 필름은 **open circuit** 전압을 발생하게 된다. 따라서 우리는 압전필름을 액츄에이터 혹은 센서로써 사용할 수 있는 것이다. 이를 위해서는 필름양면에 전극을 입혀야 하는데 보통 **silver**나 **알루미늄**이 많이 사용되고 있다. 이렇게 전극을 입힌 필름은 사실 하나의 캐패시터로 볼 수 있으며 필름의 두께 및 크기에 따라 캐패시턴스가 결정된다. 표 3은 압전필름의 일반적인 성질을 나타낸다. 표에 주어진 **strain constant**와 **stress constant**는 각각 **d** 상수 및 **g** 상수로 불리우며 가해진 압력 및 압전필름 표면에 발생된 전하밀도와 상관관계가 있다. 다시 말해서 **d** 상수는 액츄에이터

표 3 압전필름의 일반적 성질

성 질	수 치
두 계	$9, 28, 52, 110, 500 \times 10^{-6} \text{ meter}$
스트레인 상수 (d 상수)	$23 \times 10^{-12} \frac{\text{m/m}}{\text{V/m}}$ or $\frac{\text{C/m}}{\text{N/m}}$
스트레스 상수 (g 상수)	$216 \times 10^{-3} \frac{\text{V/m}}{\text{V/m}^2}$ or $\frac{\text{m/m}}{\text{C/m}^2}$
캐패시턴스	380 pF/cm^2 for $28 \mu\text{m}$ film
탄성계수	$2 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
음파속도	$2.2 \times 10^3 \text{ m/s}$
초전계수	$-25 \times 10^{-6} \text{ C/m}^{20} \text{ K}$
밀 도	$1.78 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
작동온도	-40°C to 100°C
최대작동전압	$750 \text{ V/mil} = 30 \text{ V}/\mu\text{m}$
방전전압	$2000 \text{ V/mil} = 100 \text{ V}/\mu\text{m}$

상의 변수로, g 상수는 센서상의 변수로 각각 사용한다.

4. 잠재적 응용성

4.1 ER 유체

ER 유체를 이용한 장치는 간단한 밸브에서부터 지능 우주 구조물에 이르기까지 매우 광범위하며 다양하다. 이중에서 지금까지 가장 활발히 연구 개발되고 있는 분야는 자동차 산업 관련 분야인데 그 예로서 ER 클러치 시스템, ER 액튜에이터, ER 속옴서버, 진동 제어형 ER 엔진마운트, ER 브레이크 시스템 및 각종 ER 밸브등을 들 수 있다. 그림 4는 미국 Lord사에서 개발중인 진동 제어형 ER 엔진마운트로서⁽³⁾ 기존의 고무로만 되어 있었던 것을 설계 변경한 것이다. 상하부에 있는 ER 유체의 압력 차가 고정된 ER 전극밸브(electrode valve)에 의해 제어되며 또한 외부 전장에 의해 전체 마운트 시스템의 고유진동수등 기계적 성질이 제어되기 때문에 엔진소음과 진동을 줄일 수 있다. 상품화 단계로의 도약에 있어서 현재 가장 어려운 점은 고온에 있어서 ER 유체의 효과 하락을 들 수 있다. 이미 언급한 바와 같이 현재 사용하고 있는 거의 모든 유체는 수분을 포함하고 있기 때문에 엔진마운트의 높은 온도상승으로 인한 수분 증발 현상이 일어난다. 이 때문에 ER 유체를 통과하는

전류가 증가하게 되며 따라서 ER 유체 효과 하락은 물론 전력소비의 증가를 가져온다. 미국의 GM사 및 영국의 Sheffield 대학 등에서는 ER 클러치 시스템을 개발중에 있는데 가장 큰 난제는 클러치에 의해 전달될 수 있는 최대 토크로 용량이다. 현재 사용되고 있는 ER 유체를 이용할 경우 실용화를 위한 토크를 얻기 위해서는 기존의 시스템보다 훨씬 큰 시스템 설계가 요구된다. 일반적으로 ER 클러치 시스템에서 요구되는 것은 전장 부하시 토크와 전장제거시 토크 사이의 높은 비율이다. 이는 유체의 점성과 전극간의 거리를 조절함으로써 최적화가 어느 정도 가능하지만, 무부하시 점성효과를 줄이기 위해 전극간의 거리를 증가시키는 것은 현실적으로 불가능한 매우 높은 전압을 요구하게 된다. ER 유체를 이용한 밸브 및 유압 시스템도 개발이 한창인데 이들 장치의 가장 두드러진 장점은 기존의 시스템보다 반응속도가 매우 빠르다는 것이다. ER 유체의 빠른 반응속도는 폐회로(closed-loop) 피드백 시스템에서 있어 매우 중요한 요소이며 또한 기계적 장치의 단순화도 가져올 수 있다.

최근들어 ER 유체를 이용한 지능구조물 개발에도 많은 연구가 진행중이다. 이 지능구조물은 알루미늄 혹은 복합재료와 같은 기존의 구조재료로 만든 속이 빈 샌드위치형의 구조물 사이에 ER 유체를 삽입하여 만든 것으로 전체 구조물의 강도, 점성등 기계적 성질이 외부의 전장공급에 의해 제어된다. 이는 주로 유연 구조물의 진동제어에 많이 쓰이는데 그 대표적인 예가 그림 5에 잘 나타나 있다⁽⁴⁾. 그림에서 보는 바와 같이 항공기 날개속에 각기 다른 특성을 갖고 있는 ER 유체를 삽입하여 예기치 못하는 기상조건 변화에 대해 각요소(element)에 필요한 전장공급을 하여 날개 스스로가 구조물의 특성을 제어하며 따라서 항공기 자체의 진동을 억제할 수 있다. 물론 적절한 전장공급을 위해서는 각 요소마다센서의 설치와 폐회로 피드백 시스템 장착이 필요하다. 그리고 이러한 능동제어형 지능구조물의 성공적인 개발을

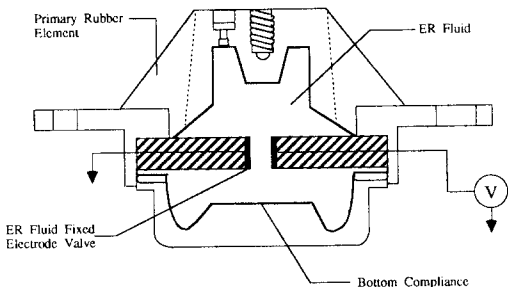


그림 4 ER 유체를 이용한 능동 제어형 엔진마운트

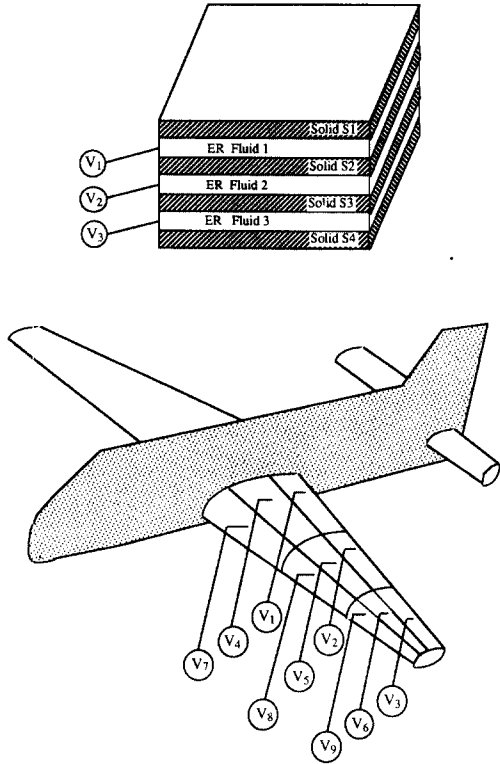


그림 5 ER 유체를 이용한 스마트 항공기 날개

위해서는 무엇보다도 구조물의 정적 및 동적 모델링을 비롯하여 알맞은 제어기의 설계문제가 선결되어야 한다. 모델링 과정에서 특히 고려해야 될 사항으로는 ER 유체와 기존 구조물 사이의 인터페이스, 전극의 전도성, 기존구조물 내부의 표면상태 및 형상 그리고 ER 유체의 전기적 및 절연적 성질등을 들 수 있다. 이와 함께 세밀한 실험적 고찰을 통한 현상학적 특성파악도 병행해서 수행되어야 한다. 제조 및 산업기계 분야에서 ER 유체를 이용한 많은 장치가 개발중인데 그 대표적인 예로 그림 6에서 보는 바와 같이 고속·고정도를 위한 산업용 ER 로봇을 들 수 있다⁶⁾. ER 유체의 빠른 반응속도를 특징으로 하는 액튜에이팅 조인트와 능동 제어형 지능구조물을 특징으로 하는 로봇 팔을 사용하므로써 고속·고정밀도를 얻

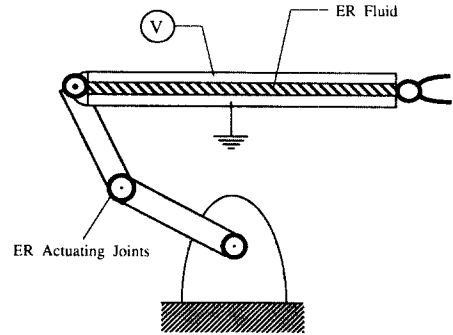


그림 6 ER 유체를 이용한 산업용 로봇

을 수 있으며 따라서 제조업의 품질개선과 생산성 향상을 꾀할 수 있다. 이 밖에 ER 유체를 이용한 능동제어형 장치로는 유연 치공구시스템, 댐퍼, 지진에 견딜수 있는 건물 및 교량, 테니스 라켓 그리고 방직기의 spooler 등을 들 수 있다. 물론 ER 유체는 대전자 및 장갑차등의 진동방지를 위한 현수 장치 시스템에도 사용할 수 있어 작동방식과 성능면에 있어서 획기적인 전략적 전환을 가져올 수 있다. 이상에서 살펴 본 바와 같이 ER 유체를 이용한 장치들이 성능면에서 이상적인 느낌을 주지만 아직 상품화가 된 것이 하나도 없는 것은 ER 유체 관련기술이 용이 하지만은 않다는 것을 암시한다.

4.2 압전필름

잘 알려진 바와 같이 압전필름의 응용범위는 매우 다양하며 광범위하다. 특히 센서로서의 응용은 이미 많은 분야에서 상품화가 되어 있으며, 품질면에서도 우수성을 나타내고 있다. 각종산업 및 장난감용 스위치, 스포츠용 센서(테니스 라인 센서, 골프 연습용 타겟 센서 등) 및 오디오 제품예의 응용(각종 스피커 및 아미크로폰)등 우리 실생활과 직접 관련된 여러 분야에서 이용되고 있다. 또한 최근들어 압전필름을 이용한 가속도 센서가 개발되어 각종 산업용 장비의 진동 특성 측정에 이용되고 있다. 자동차 산업분야의 연료 분사 제어장치 및

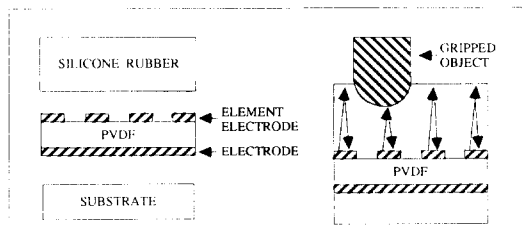


그림 7 압전필름을 이용한 접촉센서

연료탱크 level 측정에도 응용되고 있으며 산업용 로봇의 접촉 혹은 토크 센서로서도 이용된다. 그림 7은 압전필름을 이용한 접촉센서의 구성요소와 힘이 가해졌을 때 초음파 펄스 방향 원리를 이용하여 패드두께 변화를 측정하며 따라서 접촉력을 구할 수 있다. 패드두께는 필름에서 발생된 초음파 펄스가 패드를 지나 필름까지도 되돌아오는 시간에 의해 결정되며 패드를 누르는 접촉력은 패드재료의 음파속도 및 모듈러스 특성을 고려하므로써 쉽게 계산할 수 있다. 이러한 접촉센서의 요구조건으로써는 필름의 높은 유연성, 적절한 임계 민감도, 빠른 반응시간 및 낮은 hysteresis 등을 들 수 있다.

액츄에이터 측면에서의 압전 필름 이용은 센서 측면 보다는 취약하나 최근들어 공작기계 혹은 로봇등의 고정밀 미세 위치 제어 및 지능구조물 개발과 함께 많은 연구가 추진중이다. 미세 위치 제어에 사용되는 액츄에이터 형태에는 바이몰프 및 적층형등이 있다. 바이몰프는 2개의 얇은 필름을 집합시켜 서로 상반되는 변위를 일으켜 필름을 굴절시키는 것으로 구조가 간단하며 경량이다. 적층형은 얇은 필름을 여러개 쌓아 놓은 것으로 높은 강성과 출력 그리고 빠른 반응속도를 얻을 수 있다. 압전필름을 이용한 지능구조물의 개발은 1980년대 후반에 시작되었으며 항공우주 관련 대형 유연구조물의 능동 진동 제어용으로 많은 연구가 진행중이다. 구체적인 예로서는 인공위성의 유연 appendage, 긴 팔을 갖는 space로 로봇 및 항

공기 날개등을 들 수 있다. 이들 유연 구조물들은 보다 우수한 성능을 위해 경량화가 요구되나 이에 따른 진동 문제가 심각하게 대두되어 고무사용 같은 수동적인 진동제어 방법을 지향한 구조물 자체의 능동적 진동방향이 출현하게 되었다. 이미 언급한 ER 유체와 더불어 압전필름을 이용한 지능구조물 개발로 매우 높은 진동제어 효과를 얻을 수 있음이 실험을 통하여 증명되었다. 압전필름을 알루미늄과 같은 기존의 구조물 표면에 접합 시키거나 그림 8에서 보는 바와 같이 복합재료 ply 속에 삽입시켜⁽⁷⁾ 만든 지능구조물은 적절한 센서 및 제어기와 결합하여 예기치 못하는 외부 환경 변화로 인한 구조물의 진동에 대해 적당한 전압 즉 액츄에이팅힘을 가하여 진동을 제어할 수 있는 것이다. 물론 이러한 지능구조물 개발에 있어 중요한 요소는 정확한 운동 방정식을 위한 모델링과 높은 제어효과를 얻을 수 있는 최적 제어기 설계이다. 모델링 과정에서 특히 고려되어야 할 사항은 접합효과(bonding effect) 및 hysteresis 그리고 액츄에이터 및 센서의 수와 위치선정이다. 지금까지 알려진 모델링 방법으로는 Hamilton's principle, variational principle 및 유한 요소법등이 있다. 현재 실험을 통하여 높은 효과가 증명된 제어기로서는 constant amplitude 피드백 제어기 및 constant gain 피드백 제어기를 들 수 있다. 이들 두 제어기의 공통된 특징은 구조물의 속도를

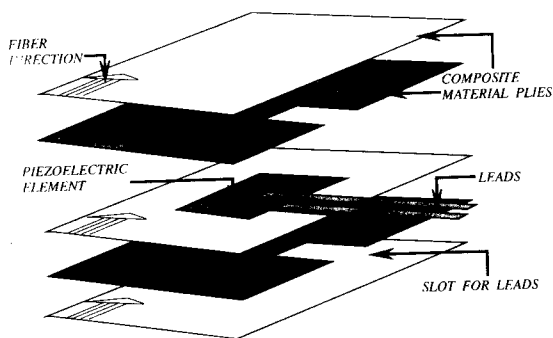


그림 8 압전필름을 이용한 지능 복합재료 구조물

측정하여 180° 위상을 바꾼 전압을 가함으로써 진동억제를 하는 것이며 전자는 후자에 비해 제어효과가 높으나 많은 전력 소비를 요구한다. 이외에도 가변제어기, independent modal 제어기, LQG 제어기등을 통한 실험적 고찰이 시도되고 있다.

5. 맺음말

이상에서 살펴본 바와 같이 SMS에 대한 기술은 21세기를 향한 새로운 차원의 신생하는 그리고 강한 창조성(originality)을 띤 최첨단 기술의 하나로 부각되고 있으며 특히 SMS의 무한한 응용성으로 미루어 볼 때 연구개발의 급격한 증대가 기대된다. 이에 이 분야 기술이 미약 혹은 전무한 우리나라에서도 하루 빨리 연구개발에 착수하여 SMS 관련 신소재 개발은 물론 자동차, 항공, 국방, 건설, 의료 및 각종 제조 산업분야에서의 응용장치 개발을 통한 고부가가치 창출과 국제 경쟁력 강화 그리고 전략적 효과 상승 및 국제적 지위권 확보를 꾀해야 할 것으로 사료된다. SMS 기술분야의 광범위성 관계로 치밀한 정부주도 계획하에 체계적이고 합리적인 연구개발이 산·학·연의 적극적인 협조체계를 통해 이루어져야 한다고 판단된다. 보다 나은 인류의 삶을 위해 그리고 환상적인 미래의 세계가 환상자체에 그치지 않도록 새로운 차원의 신생하는 첨단기술 개발에 부단한 노력이 요구된다고 하겠다.

참 고 문 헌

- (1) Rogers, C.A., Barker, D.K. and Jaeger C.A., 1988, "Introduction to Smart Materials and Structures," Proc. of ARO Smart Materials, Structures, and Mathematical Issues Workshop, pp. 17~28.
- (2) Winslow, W.H., 1949, "Induced Fibration Suspensions," J. of Applied Physics, Vol. 20, pp. 1137~1140.
- (3) Duclos, T.G., 1988, "Electro-Rheological Fluids and Devices," Automotive Engineering, pp. 45~48.
- (4) Gandhi, M.V., Thompson, B.S. and Choi, S.B., 1989, "A New Generation of Innovative Ultra-Advanced Intelligent Composite Materials Featuring Electro-Rheological Fluids: An Experimental Investigation," J. of Composite Materials, Vol. 23, pp. 1232~1255.
- (5) Gandhi, M.V., Thomposon B.S., Choi, S.B. and Shakir, S., 1989, "Electro-Rheological-Fluid-Based Articulating Robotic Systems," ASME J. of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, Vol. 111, pp. 328~336.
- (6) Grahn, A.R. and Astle, L., 1985, "Robotic Ultrasonic Force Sensor Arrays," Research Report, Bonneville Scientific Labs, Utah, U.S.A.
- (7) Hagood, N.W., Crawely, E.F., Luis, J. and Anderson, E.H., 1988, "Development of Integrated Components for Control of Intelligent Structures," Proc. of ARO Smart Materials, Structures, and Mathematical Issues Workshop, pp. 80~104.

