

자동차 산업관련 전기점성유체 이용기술

Technology Utilizing Electro-Rheological Fluids for Automotive Industries

최 승 복, 민 수 흥, 정 재 천
S. B. Choi, S. H. Min, C.C.Cheong



최 승 복
• 1955년 1월생
• 스마트재료 이용 로봇, 자동차 부품등의 설계 및 제어메카니즘 연구
• 정회원, 인하대학교 기계공학과



민 수 흥
• 1928년 3월생
• 금속재료의 열처리에 따른 기계적 및 물리적 특성 분석 연구
• 정회원, 인하대학교 기계공학과



정 재 천
• 1936년 4월생
• 컴퓨터 이용 기계구조물, 자동차 부품등의 최적설계 및 용력 해석 연구
• 정회원, 인하대학교 기계공학과

1. 머리말

노면상태, 외부의 기상조건 혹은 내부의 어떠한 악조건하에서도 전혀 진동과 소음이 없는 자동차의 출현이나 지진의 영향에도 견고히 견딜 수 있는 스마트 교량 및 빌딩의 출현 등은 21세기를 향한 환상의 꿈이 아닌 현실로 차츰 차츰 우리 곁으로 다가오고 있다. 이러한 꿈의 실현을 위해 최근들어 미국을 비롯

몇몇 선진국에서는 신생하는 최첨단 기술의 하나로 소위 스마트 재료 및 구조물 (smart materials and structures: SMS)에 대한 연구가 활발히 진행중이다. 지금까지 일반적으로 인식되고 있는 SMS의 정의를 내린다면 SMS란 재료자체 혹은 현존하는 구조재료와 결합한 것으로서 센싱, 액츄에이팅, 제어, 학습 (learning), 계산 등의 능력을 보유한 것을 말하며 재료의 기계적 및 물리적 성질이 외부의 전압, 열 혹은 빛 등에 의해 감지 및 제어되며 그 반응속도는 천분의 1초 이하로 매우 빠르다. 따라서 SMS는 하중 또는 예측하기 힘든 외·내부의 환경조건 변화에 대해 재료자체 고유의 지능으로 유효 적절히 대처할 수 있는 기능을 보유하고 있다. 이러한 고유의 지능을 보유하고 있는 SMS의 연구는 약 4년전부터 미국, 영국, 일본 등에서 몇몇 연구가들에 의해 산발적으로 진행되어 오다가 지난 1988년말 미국 육군성 연구단에서 주체한 SMS에 관한 워크숍을 계기로 실질적인 연구기반이 이룩되었고 새로운 학문의 하나로 자리를 잡게 되었다.¹⁾ SMS에 관한 전문 국제저널도 1990년도에 창간을 보게 되어 이 분야 연구의 질과 내용이 급상승되고 있으며 체계화되어 가고 있다. 따라서, 본 글에서는 지금까지 알려진 SMS 부류에 속하는 것으로서 가장 잠재적 응용가치가 큰 것으로 인식되며 특히 자동

차산업과 관련하여 미국, 일본 등에서 활발히 연구 개발중에 있는 전기점성(electro-rheological: ER) 유체의 전반적인 세계연구동향, 이론적 배경 그리고 응용성에 관하여 소개하고자 한다.

2. 연구동향

전기장(electric field)에 의해 영향을 받는 유체의 발견은 1880년 독일에서 처음 보고²⁾ 되었으나 1947년 미국의 W. Winslow가 미세한 고체입자인 녹말가루와 광물성 기름을 혼합하여 만든 불용해성의 유체에 약 3kV/mm의 전기장부하시 유체저항의 현저한 증가현상이 나타남을 보고³⁾할때까지는 그 중요성이 인식되지 못했다. Winslow는 부하된 전장이 유체의 점성을 증가시킨다고 가정했고 따라서 그 물질을 'electroviscous fluid'라고 이름지었으며 가끔 그의 이름을 따서 'Winslow's fluid'라고 부르기도 했다. 이러한 유체의 잠재적 가치의 중요성은 즉시 인식되었고 많은 회사들이 Winslow가 보고한 물질중에 가장 효과가 좋은 실리카젤형의 유체를 이용 진동기(vibrator) 및 가변 제어형 댐퍼 개발을 시도했다. 그러나 실리카젤형 ER 유체의 큰 마모성 때문에 의욕에 넘치던 모든 시도는 수포로 돌아 갔으며, 1980년경 영국에서 이 유체에 대한 연구가 다시 시작될 때 까지 이 분야에 대한 연구 흥미도는 매우 취약했다.

현재 선진국의 전반적인 ER 유체 연구현황을 보면 자동차산업 분야에서 가장 활발히 진행되고 있으며 최근들어 ER 유체 이용 지능 구조물(smart structure) 개발에 대한 투자도 급격히 증가되고 있는 추세다. 미국에서는 약 3년전부터 국방성의 주관하에 몇몇 대학 및 연구기관에서 ER 유체 및 응용장치 개발에 연간 2천만불 이상을 투자해 오고 있다. 그 예로서 Michigan 주립대학교에서는 ER 유체 이용 지능 구조물 개발을, North Carolina 주립대학교에서는 성능이 우수한 ER 유체 개발을, 그리고 Stanford 대학교에서는 ER 유체에 대한 정확한 모델링 연구를 추진하고 있다. 한편 미국의 General Motor사, Ford Motor사, Lord

사 등에서는 ER 유체를 이용한 자동차 클러치 시스템, 실시간 진동제어형 엔진마운트, 능동 제어형 가변 댐퍼 및 속옵서버 등의 개발에 지난 2년전부터 연간 4천만불 이상을 투자하여 활발한 연구가 추진중인데 아직 상품화 단계는 아니며 실험모델을 통한 성능시험을 하고 있다. 그리고 미국 McDonnell Douglas 사를 비롯 여러 항공산업 관련사에서는 지난해부터 ER 유체 이용 항공기 현수장치 및 동특성 제어형 헬기 블레이드 등의 개발을 추진해 오고 있다.

ER 유체에 대한 영국의 개발현황을 보면 주로 학계에서 유체개발과 이를 이용한 응용장치 개발에 많은 힘을 기울이고 있다. Cranfield 공대에서는 다양한 ER 유체개발과 유체의 화학적 및 물리적 특성 연구에 주력하고 있으며, Sheffield 대학교에서는 ER 유체 이용 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. 특히 ER 유체 연구 협동조합을 통한 산·학·연의 상호 기술교류가 원활하게 이루어지고 있는 것이 특징이다. 소련 또한 ER 유체 이용 모니터형 제어장치 능동제어형 디스트리뷰터(distributor), 안전밸브, 회전형 점도계 등 다양한 장치 개발에 많은 투자를 하고 있으며, 일본의 경우 ER 유체에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 것은 확실하나 기술개발의 특허화와 자신들의 연구결과 노출금지를 위해 정보비밀에 신경을 쓰기 때문에 구체적인 진행과정이나 연구깊이 등은 잘 알려지지 않은 실정이다. 그러나, 최근 닛산자동차, 요코하마 국립대학 등에서 발표한 ER 유체 이용 속옵서버 및 스퀴즈 필름 댐퍼 개발로 미루어 볼 때 상당한 기술수준에 와 있음을 예측할 수 있다. 이 밖에 스웨덴에서는 ER 유체에 대한 본격적인 연구개발 착수를 위해 지난 2년여전부터 정부주도하에 전문단을 구성하여 정확한 자료수집 및 분석을 통해 연구 방향설정을 추진하고 있는 중이다. 한편, 국내의 경우 ER 유체 및 관련 기술분야

연구가 거의 전무 혹은 매우 미약하다고 사료된다.

3. 이론적 배경

3.1 기계적 및 물리적 특성

초기 ER 유체에 대한 해석은 전기장 부하시 일어나는 유동변화(rheological change)의 이해 부족으로 많은 문제점을 던져 주었다. 예를 들어 전기장 부하에 의해 유체의 점성 변화만이 발생한다는 생각은 잘못된 인식이었다. 만일 약간의 간격을 둔 기름으로 채워진 두 개의 편평한 판을 고려한다면, 판의 평면에 가해진 힘은 항상 미끄러짐을 유발할 것이다. 주어진 힘과 판의 면적에 대해 미끄러짐율은 기름두께가 얇아수록 증가하며, 힘을 전혀 가하지 않는 경우라도 미끄러짐은 결코 영으로 되지 않는다. 그러나 만일 두 판 사이가 건조하고 함께 눌림을 받을 때는 아주 다른 운동 현상이 나타난다. 즉 주어진 힘이 정적 마찰력을 초과할 때까지는 미끄러짐이 발생하지 않으며, 일단 미끄러짐이 시작되면 그것을 유지하기 위한 힘은 정적 마찰력보다 조금 적으며 실제적으로 미끄러짐을과는 무관하다. 일반적으로 전기장의 무부하시 두 판 사이의 ER 유체는 일반 기름과 매우 흡사한 운동을 하나 전압이 부하되면 그 운동은 건조한 판에서 일어나는 현상과 같다. 즉 건조한 판을 누르는 힘의 증가에 따라 마찰력이 증가하는 것과 같이 두 판 사이의 전압부하 증가에 따라 운동을 시작하고 유지하기 위한 힘이 증가한다. 따라서 Winslow가 보고한 유체에 있어서의 유체저항의 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 전기장 무부하시 액체 상태가 전기장 부하시 고체상태로 변화하는 것이다. Fig.1은 전극(electrode)의 전하와 ER 유체 입자의 전하 사이에 어떻게 해서 이러한 변화가 일어날 수 있는가를 보여 준다. 전장 무부하시에는 그림에서 보는 바와 같이 유체입자의 전하는 양극

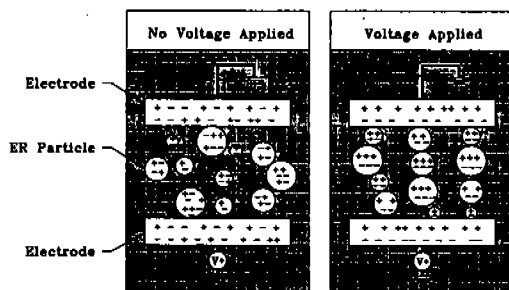


Fig.1 Effects of electro-rheological fluids

혹은 음극이 될 수 있으며 자유로이 운동을 한다. 이때 유체는 등방향(isotropic)의 물리적 및 기계적 성질을 갖게 된다. 그러나 전기장 부하시에는 유체입자의 전하는 체인형 구조를 형성하게 되며 이방향(anisotropic)의 물리적 및 기계적 성질을 갖게 된다. 이 체인형 구조로 인해 유체의 운동이 제한되며 따라서 유체의 모든 유동성질이 변화한다. 전기장이 무부하상태로 될 때 유체는 다시 본래의 랜덤(random) 구조를 갖게 된다. Fig.2는 ER 유체의 액체 및 고체 상태를 보여주는 사진으로서 이 유체는 최근 인하대학교 기계공학과 계측 제어실에서 개발한 것이다. 전기장의 무부하시 유체의 흐름을 볼 수 있으며 전기장 부하시 겔(gel) 형태의 고체상태가 됨을 알 수 있다. 일반적으로 ER 유체의 상변화(phase change)를 위해 요구되는 전기장의 크기는 약 2~3kV/mm(유체두께)이나 전류밀도(current density)가 약 10 μA/cm² 이하이기 때문에 상변화를 위해 요구되는 전력은 매우 낮다. 그리고 전장에 대한 유체의 반응속도는 1ms 이하이며 최대반응주파수는 약 12kHz이다.

역학적인 관점에서 현재 사용되고 있는 일반적인 ER 유체의 유동성질을 보면 Fig.3과 같다. 전기장(E) 무부하시 ER 유체는 Newtonian 유체로 간주되지만 사실 전장 부하에 따른 ER 유체의 거동형태는 매우 복잡하다고 할 수 있다. 전기장으로 인한 ER 유체의 거의 공통적인 현상은 Bingham 거동이며 항복응력(τ_y)은 전기장의 증가에 따라 증가한다(일반적으로 $\tau_y \propto E^2$). 따라서 유체에 전기장 부하시 전단응력(τ)의 전단율($\dot{\gamma}$)에 대한 의존도로

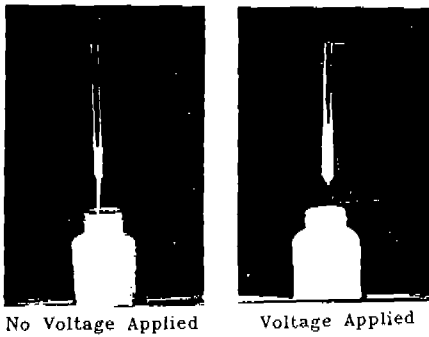


Fig.2 Photograph of ER fluids

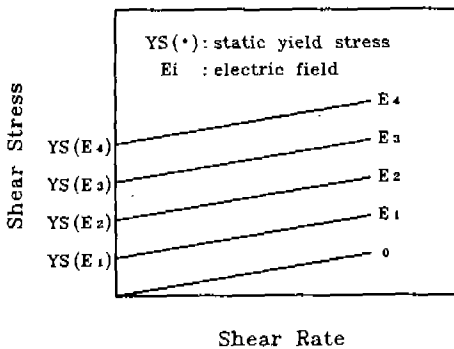


Fig.3 Field-induced behavior

부터 전기장으로 인한 전단응력의 증가 및 어느 정도의 정적 항복응력이 발생하였는지를 알 수 있다. Bingham 거동의 경우 유체가 고체상태로 상변화 했다고 말할 수 있지만 $\tau < \tau_y$ 시 이 고체가 느린 크립(creep) 현상 혹은 탄성(elastic) 현상을 가지고 있는지 그리고 이러한 조건하에서 어느 정도의 경화(hardening) 현상이 발생하는지는 현재까지 잘 알려져 있지 않다. $\tau = \tau_y$ 시 유체의 흐름이 시작되며 고정된 $\dot{\gamma}$ 에서 $\tau(E) > \tau(0)$ 인 영역으로 흐름은 계속된다. 어느 특정한 ER 유체의 경우 낮은 $\dot{\gamma}$ 영역에서 유체 흐름이 시작된 직후 $\tau(E)$ 의 급강하와 같은 매우 복잡한 현상이 발생하기도 한다. 그리고 또한 높은 $\dot{\gamma}$ 영역에서 $\tau(E) - \tau(0)$ 가 감소한다는 이론적 근거가 제시되고 있으나 아직 실험적 고찰을 통한 증명은 되고 있지 않다. 전기점성계수(electroviscosity)로 정의되는 변수 $\tau(E)/\dot{\gamma}$ 은 고정전기장에서의 저전기장에서의 $\dot{\gamma}$ 의 변화에 따라 급격히 강하하며 이 계수의 미분치 즉 $d\tau(E)/d\dot{\gamma}$ 은 전장

에 대한 의존도가 거의 없다는 것이 일반적으로 잘 알려진 사실이나 높은 $\dot{\gamma}$ 에서 ER 효과 현상이 없어진다는 것은 아주 잘못된 인식이다.

많은 연구자들이 ER 유체 메카니즘에 대한 여러가지 이론과 모델을 제안하고 있으나 지금까지 이렇다 할만한 획기적인 구체적이고 정량적인 해석은 나오지 않고 있으며 의견조차 분분한 실정이다. ER 유체 모델링의 복잡성은 무엇보다도 고체입자 시스템의 전기적 성질과 유체 흐름간의 상호작용에 대한 이해 부족에서 기인된다. 이러한 문제를 해결하는데 있어 가장 심각하게 고려해야 될 사항은 전기장에 의한 ER 유체의 극전화(polarization) 현상이며 그 이유는 극전화 현상의 크기는 ER 효과에 매우 중요한 영향을 주기 때문이다. 극전화 현상에 의한 메카니즘은 제어요소가 아니기 때문에 이중층(double-layer)의 전장왜곡(field distortion)으로 해석되는 경우가 있다. 이러한 이중층 극전화 현상은 이중층 사이의 이온유동을 포함할 때 일어날 수 있으며 상호 접촉 영역과 관계있는 전하이동 메카니즘의 하나로 간주된다. 일반적으로 이러한 극전화 현상을 Maxwell-Wagner 현상으로 분류하며 고체입자의 표면 등을 통해 일어난 쌍극자 간의 힘은 쿨롱력(coulombic force)을 발생시켜 ER 효과를 가져온다는 가정이 널리 이용되고 있으나 이에 대한 정확한 실험적 입증은 해결해야 될 과제로 남아 있다.

3.2 화학적 조성

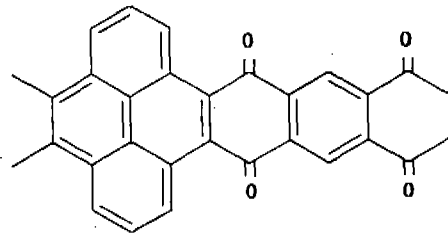
지금까지 알려진 대부분의 ER 유체 성분을 보면 전도성의 고체입자(dispersed phase), 알맞은 질연성의 기본액체(dispersant) 그리고 ER 효과를 향상시키기 위해 사용되는 첨부제(additive) 등으로 이루어져 있다. 이러한 ER 유체가 전기장에 의해 영향을 받기 위한 최소한의 기본조건으로서는 ER 유체 조성시 사용되는 액체는 물을 싫어해야 하며 고체입자는 적당한 양의 수분흡수를 위해 물을 좋아해야 하고 다공성이어야 한다. 대부분의 ER 유체에 있어 첨부제로서는 수분이 사용되고 있으나 이것이 유일한 것은 아니며 이외에도 고체입자의 선택에 따라 알콜, 에틸린 글리콜(ethyl-

ene glycol) 및 소금 등이 사용될 수 있다. 고체입자의 수분흡수는 거의 필수적이며 흡수된 양은 최종 유체 성질에 큰 영향을 준다. ER 유체의 고체상(solid phase)을 형성하기 위한 입자특성에 따른 최적 수분함량이 존재하며 이를 초과할 경우 전열성 및 전도성의 변화로 전단응력의 강화현상이 발생한다. 지금까지 실험을 통하여 알려진 최적 수분함량은 대부분의 유체에 있어 무게비로 약 5~10%이다. 그리고 일반적인 기본액체의 경우 매우 낮은 절연계수(dielectric constant)를 갖는 것이 좋는데 그 이유는 실제 응용상에서 고전기장 부하시 이러한 액체는 매우 높은 전압에도 견딜 수 있기 때문이다. 그러나 높은 절연계수를 갖는 액체가 우수한 ER 효과를 가져올 수 있다는 사실로 미루어 볼 때 이에 대한 최적 선택이 요구된다.

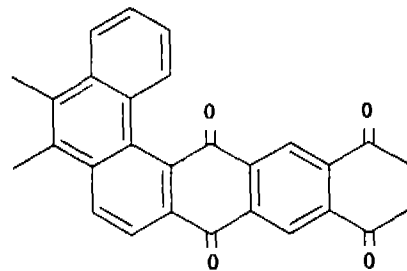
ER 유체에 있어서 고체입자의 기공 사이에는 유동이온이 있으며 이 유동이온은 정상적인 방법으로 물분자를 모은다. 전기장이 유체에 부여될 때 이온은 수분을 수반하여 입자의 한쪽 끝으로 이동하며 따라서 수분 브리지(water bridge)를 형성하게 된다. 전기장의 제거시 수분은 생성된 쌍극자가 분산되면서 다시 입자 사이로 들어간다. 이온화 입자는 비이온화 입자보다 강한 ER 유체를 부여하게 되는데 예를 들어 알긴산(alginic acid)은 녹말가루 보다 3배 이상 강한 효과를 낼 수 있다. 칼슘과 마그네슘 같은 매우 높은 전하밀도의 이온은 활발치 못한 ER 유체를 부여하게 되는데 그 이유는 이온들이 단단히 뭉쳐서 전기장 부하시 이동할 수 없기 때문이다. Tetramethylguanidium과 같은 고체계의 음이온도 수분을 충분히 지탱하지 못하기 때문에 낮은 ER 효과를 가져온다. 이온유동의 허용을 위한 고체입자의 기공에 대한 필요성은 샘플 고체입자를 완전히 건조시킨 후 재수화(rehydrating)함으로써 용이하게 증명될 수 있으며, 어느 일정한 점 이상으로 건조되었을 때 물을 좋아하는 기공성의 고체입자는 내부 수소결합을 형성하기 때문에 계속해서 첨가된 수분은 그 조직을 침투할 수 없게 된다. 최근 들어 반전도성(semiconducting)의 건조 ER(dried ER)유체

가 조사 연구되고 있으며 이러한 경우 정확한 이온유동 메커니즘은 고체, 계면활성제(surfactant) 및 습기 같은 주변환경조건 등을 고려해서 파악되어야 한다. 이러한 형태의 하나인 acene-quinone 폴리머의 반복단위 구조가 Fig.4에 잘 나타나 있다.

최종 ER 효과를 좌우하는 요소 가운데 고체입자의 농도 또한 매우 중요하다. 많은 연구가들에 의해 발견된 바로는 고체입자의 최적 부피비는 0.1~0.4이며 너무 높은 고체입자의 농도는 유체성을 상실하며 ER 효과에 반작용을 하는데 그 이유는 전도성의 입자 사이가 너무 치밀하기 때문에 전극 사이에서의 방전(shorting) 현상을 유발하기 때문이다. 그리고 부피비가 0.1이하인 경우는 지금까지 실험적으로 조사 연구된 바는 없으나 매우 낮은 ER 효과를 가져온다는 의견이 지배적이다. 고농도의 경우 암시된 ER 효과의 포화현상(saturation) 발생과 유체를 통하는 고전기장에서의 전도성 'runaway' 경향은 전극간의 거리를 조절함으로써 어느정도 줄일 수 있다.



Pyrene Quinone Radical Polymer



Phthenanthrene Quinone Radical Polymer

Fig.4 Structure of the repeat unit for semiconducting polymers

사실 전기장으로 인한 전단응력 증가의 고체 농도 부피비에 의한 의존도를 확인하는 정확한 데이터는 부족하며 대부분의 연구목적은 전기장 무부하시 유체성 및 작동전기기의 전력요구 최소화 등과 같은 응용 매개변수와 관련한 최적농도를 알아내는데 주력하고 있다. 고체입자의 형상 및 크기 또한 ER 효과에 많은 영향을 주고 있음이 확실하나 이에 대한 연구 부족으로 많은 점이 미해결 상태로 남아 있다. 현재 사용되는 고체입자의 형상은 매우 불규칙하나 용액과 결합하여 마치 구의 형상과 흡사하다고 가정하고 있다. 대부분의 입자는 미세하게 연삭된 분말형태로 사용되며, 입자의 최적크기는 약 $0.04 \sim 50 \mu\text{m}$ 로 알려져

있다. 비록 입자크기의 상한치가 전극거리의 10분의1 정도로 나와 있으나 명백한 상·하한치의 정의는 없는 실정이다. 참고로 하한치에 대한 특정한 값은 실험적으로 구하기가 매우 어려우나 이는 존재해야 한다고 봐야 한다. 왜냐하면 어떠한 수준의 Brownian 운동이 ER 효과를 주며 상호작용을 극복하는지 파악되어야 하기 때문이다. 이러한 고려에도 불구하고 아직까지는 입자 크기에 대한 문제는 그렇게 심각하게 대두되고 있지 않다. ER 유체 메카니즘에 대한 기본이론과 화학적 조성방법에 있어서의 요구조건 등을 고려한 많은 종류의 우수한 ER 유체가 조성되고 있다. Table 1은 지금까지 알려진 혹은 특허화된 여러 ER 유체의 성분을 나타낸다.

Table 1 ComPosition of ER fluids

Dispersed Phase	Dispersant	Additive
alginic acid	polychlorinated biphenyls, o-dichlorobenzene, xylene, tri-fluorovinyl chloride	water
carbon	transformer oil, olive oil, mineral oil, heavy oil	water and surfactant
carboxymethy dextran	polychlorinated biphenyls, tri-fluorovinyl chloride, xylene	water and sorbitan
cellulose	chlorinated insulator oil liquid paraffin or hydraulic oil oleic acid or silicone oil	water aqueous ammonium chloride
clays(polygorskite)	hydrocarbons or lubricating oil transformer oil	water
iron(II) oxide	petroleum fractions, dibutyl sebacate, di-2-ethylhexyl adipat	water and surfactant
silica	kerosene or dibutyl sebacate naphthenic oil hydrocarbons or xylene	water and soap non-ionic surfactant water
sulphopropyl dextran	polychlorinated biphenyls o-dichlorobenzene or xylene	water and sorbitan mono-sesquioleate
titanium dioxide	white spirit (vaseline mixture) mineral oil or p-xylene phenylmethylsiloxane	triethanol-amine water and glycerol oleate

4. 응용 및 문제점

ER 유체를 이용한 장치개발의 성공적인 실현을 위해서는 다음과 같은 일반적인 조건을 만족해야 한다. ER 유체는 전력 소모의 극소화를 위해 낮은 전기장하에서 높은 전단응력과 높은 전기장하에서의 낮은 전도성을 지녀야 한다. 그리고 ER 유체는 광범위한

사용온도, 높은 안전성(stability) 및 알맞은 점성계수를 가져야 하며 고체입자의 저 마모성 및 기본액체의 무독성과 저 부식성 또한 고려해야 할 중요한 요소이다. ER 유체를 이용한 장치는 간단한 밸브에서부터 지능 우주 구조물에 이르기까지 매우 광범위하며 다양하다. 이 중에서 지금까지 가장 활발히 연구 개발되고 있는 분야는 자동차산업 관련 분야

Table 2 Significant patents relevant to ER fluids

Item Name	Inventor	Assignee
Tunable ER fluid engine mount	T. Duclos, D. Hogeson and J. Carlson	Lord Corporation
Flexible shaft comprising ER fluid-filled sleeve	A. Medzhaushe, Z. Potsyus and B. Rinkyavich	Kaun Polytechnic
Controllable ER fluid-based compression fuel injector	G. Elliot	G. Elliot
Variable camshaft drive filled ER fluid	T. Tsoiheima	Ford Motor Co.
Viscous damper with ER fluid servo-valve	D. Schubert	Barry Wright Corp.
Acoustic antenna cell containing ER fluid	R. Collins and A. Ellis	General Electric Co.
Frictional torque transmitter with ER fluid-based clutch	J. Stangroom	ER Fluids Development
Programmable bed-of-nails test jigs with ER fluid actuation	J. Collins	General Electric Co.
Hydro-dynamic transmission with ER fluid suspension	V. Koltunov, I. Sotskova and Y. Sotskov	Moscow Chemical Inst.
ER fluid actuator	J. Stangroom	U.K. Defense
Eye ball attachment device with ER fluid suspension	E. Riterman, G. Pashkova and O. Borskii	Kuib Hygiene Inst.
Vibrating assembly platform with ER fluid bed	V. Yakhimovic, Y. Khanshch and M. Lebedvosk	Sevast Instrument Inst.
Hydraulic manipulator with ER fluid-filled cylinder	V. Dorokhov and V. Gorbunov	V. Dorokhov
Viscous shear clutch assembly using ER fluid-based clutch	J. Stangroom	U.K. Defense

인데 그 예로서 ER 클러치 시스템, ER 액추에이터, ER 속읍서버, 진동제어형 ER 엔진 마운트, ER 브레이크 시스템 및 각종 자동차용 ER 밸브 등을 들 수 있다. 표 2는 ER 유체를 이용한 특허화된 응용장치의 이름과 발명자 등을 나타낸다. 이 표에서도 보는 바와 같이 자동차 관련 응용장치 개발이 증가되고 있다.

Fig. 5는 영국의 Sheffield 대학에서 개발 중에 있는 ER 클러치 시스템⁴⁾인데 상품화 단계로의 도약에 있어 가장 어려운 점은 클러치에 의해 전달될 수 있는 최대 토크 용량과 고온에 있어서의 유체효과 하락 등을 들 수 있다. 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 전기장 부하시 토크와 전기장 제거시 토크 사이의 높은 비율이다. 이는 유체의 점성과 전극간의 거리를 조절함으로써 최적화가 어느정도 가능하지만, 무부하시 점성효과를 줄이기 위해 전극간의 거리를 증가시키는 것은 현실적으로 불가능한 매우 높은 전압을 요구하게 된다. 주어진 전기장에 대해 ER 유체에 의해 지탱될 수 있는 단위면적당 최대 힘은 고체입자 성분을 증가시킴으로써 상당히 높일 수가 있지만 이는 전기장 무부하시 점성증가와 심한 경우에는 전기장 무부하시 비뉴우튼 성질을 갖게되는 경우가 있다. 그리고 이미 언급한 바와 같이 현재 사

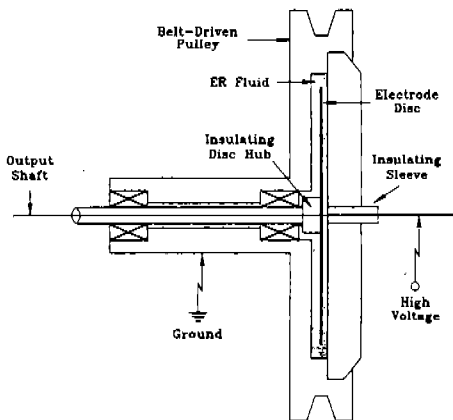


Fig.5 ER fluid-based clutch system

용하고 있는 거의 모든 ER 유체는 수분을 포함하고 있기 때문에 클러치 시스템의 높은 온도상승으로 인한 수분증발 현상이 일어난다. 이 때문에 ER 유체를 통과하는 전류가 증가하게 되며 따라서 ER 유체효과 하락은 물론 전력소비의 증가를 가져온다. 고정된 전압하에서 ER 유체를 통과하는 전류는 6℃ 온도상승마다 약 2배 이상 증가하여 이 온도상승은 수분감량을 더욱 촉진시킨다. 30℃에서 10 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 의 전류밀도는 80℃에서 3.2mA/ cm^2 의 전류밀도로 ER 유체를 통과하게 되며 따라서 모든 고체입자의 전원함(powerpack)에 매우 빠르게 과부하 현상이 발생한다. 특수한 냉각장치 혹은 고체의 수분함량과 작동상의 기대온도를 일치시킴으로써 이러한 문제는 줄일 수 있다. 더욱 바람직한 해결방법은 광범위한 온도범위에서 사용이 가능한 수분을 포함하지 않는 건조한 ER 유체를 개발하는 것이라 할 수 있다.

Fig. 6은 ER 유체를 이용한 속읍서버 폐회로 피드백(closed-loop feedback) 시스템에 관한 블록 다이어그램이다. Force 센서에 의해 실제 노면상에서 측정된 thrust 값과 속도 측정을 통해 설정된 최적 요구 thrust 값과의 비교를 통해 얻은 error 신호는 피스톤과 결합한 ER 밸브를 작동시켜 요구하는 시스템의 최종성능을 얻게 된다. 실용상에 있어서 어려운 점은 ER 유체의 안전성 등을 들 수 있다. 유체를 장시간 사용하지 않고 그대로 두면 고체입자의 침전현상이 일어난다. 이러한 현상은 액체와 고체입자의 밀도를 같게 함으로써

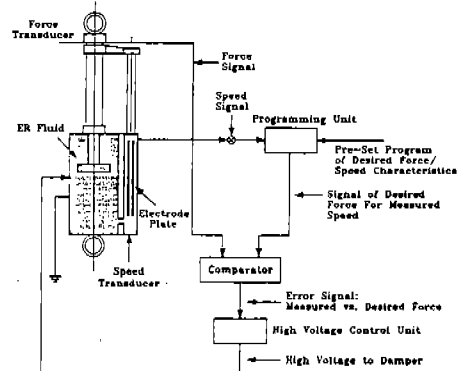


Fig.6 Block-diagram of ER shock absorber

줄일 수 있으나 밀도는 어느 일정한 한 온도에서만 일치하기 때문에 이러한 문제는 완전히 제거될 수 없다. 일반적으로 현재 ER 유체조성을 위해 사용되는 고체입자의 상대밀도는 약 1.4로 기본액체의 밀도를 높이도록 하는 특별한 조성방법이 요구된다. ER 유체를 이용한 밸브 및 유압 시스템도 개발이 한창인데 이들 장치의 가장 두드러진 특징은 기존의 시스템보다 반응속도가 매우 빠르다는 것이다. ER 유체의 빠른 반응속도는 폐회로 피드백 시스템에 있어 매우 중요한 요소이며 또한 기계적 장치의 단순화도 가져올 수 있다. Fig. 7은 미국 Lord사에서 개발중인 진동제어형 ER 엔진 마운트로서⁶⁾ 기존의 고무로만 되어있던 것을 설계변경한 것이다. 상하부에 있는 ER 유체의 압력차가 고정된 ER 전극밸브 (electrode valve)에 의해 제어되며 또한 외부 전장에 의해 전체 마운트 시스템의 고유진동수등 기계적 성질이 순간적으로 제어되기 때문에 엔진소음과 진동을 줄일 수 있다.

최근들어 ER 유체를 이용한 지능구조물 개발에도 많은 연구가 진행중이다. 이 지능구조물은 알루미늄 혹은 복합재료와 같은 기존의 구조재료로 만든 속이 빈 샌드위치형 구조물 사이에 ER 유체를 삽입하여 만든 것으로 전체 구조물의 강도, 점성등 기계적 성질이 외부의 전기장 공급에 의해 제어된다. 이는 주로 유연 구조물의 진동제어에 많이 쓰이는데 그 대표적인 예가 Fig. 8에 잘 나타나 있다.⁶⁾ 보다 구체적인 응용 예로서는 항공기 날개, 자동차 body, space robot의 팔, 인공 위성의 flexible appendage, 헬기의 blade 등을 들 수 있다. 적절한 전기장 공급에 의해 요구되는 구조물의 정적 및 동적특성을 얻을 수 있으며 더 나아가서 예측하기 힘든 환경조건 변화에 의한 구조물의 진동현상을 유효 적절히 억제할 수 있다. 이러한 능동 제어형 지능구조물의 성공적인 개발을 위해서는 무엇보다도 구조물의 정적 및 동적 모델링을 비롯하여 알맞은 제어기의 설계문제가 선결되어야 한다. 모델링 과정에서 특히 고려해야 될 사항으로는 ER 유체와 기존 구조물

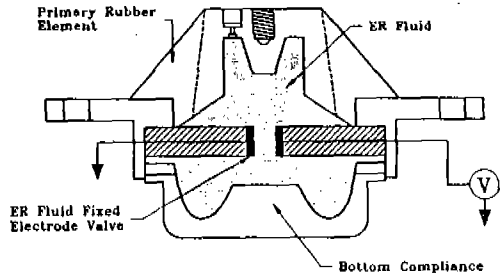


Fig. 7 Tunable ER fluid engine mount

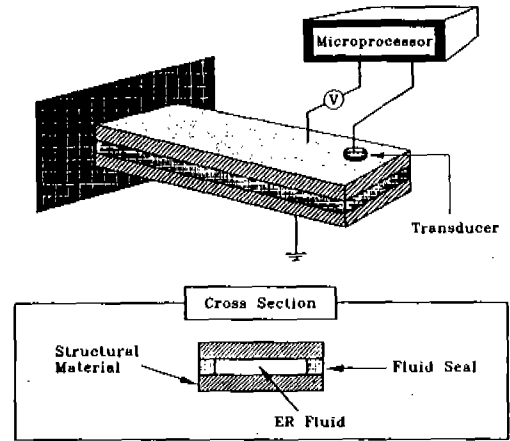


Fig. 8 Dynamically-tunable smart ER cantilevered beam

사이의 인터페이스, 전극의 전도성, 기존 구조물 내부의 표면상태 및 형상 그리고 전기적 및 절연적 성질 등을 들 수 있다. 이와 함께 세밀한 실험적 고찰을 통한 현상학적 특성파악도 병행해서 수행되어야 한다. 제어기 부분에서도 ER 유체 특성을 이용한 최적 제어기를 설계하는데 이는 기존 마이크로 프로세서 등의 제한성과 관련이 있기 때문에 용이하지만은 않다. 예를 들어 ER 유체 제어에 있어서 bang-bang 형태의 제어기가 일반적인 PID 형태의 제어기보다 훨씬 효과적이는데 그 이유는 ER 유체의 빠른 반응속도 및 d.c. 펄스의 높은 민감성 때문이다. 하지만 ER 유체에 부여할 수 있는 매우 높은 샘플링 시간으로의 전원공급은 기존 하드웨어 장치에 의한 제한성 때문에 어려운 실정이다. 이 밖에 ER 유체를 이용한 능동제어형 장치로는 방직기의 ER spooler, 각종 댐퍼, 지진에 견

될 수 있는 건물 및 교량, 테니스 라켓, 유연 치공구 시스템 그리고 산업용 ER 로봇 등을 들 수 있다. 물론 ER 유체는 대전차 및 장갑차의 진동방지를 위한 현수장치 시스템에도 사용할 수 있어 작동방식과 성능면에 있어서 획기적인 전략적 전환을 가져올 수 있다. 이상에서 살펴본 바와 같이 ER 유체를 사용한 장치들이 성능면에서 이상적인 느낌을 주지만 아직 상품화된 것이 하나도 없는 것은 ER 유체 관련 기술이 용이하지 않은 것은 것을 암시한다.

5. 맺 음 말

지금까지 ER 유체의 연구동향, 이론적 배경 그리고 잠재적 응용성 및 현재 제시되고 있는 문제점에 대해 살펴보았다. 비록 ER 유체기술이 기계, 전기, 물리, 화학 및 재료과학 등의 통합기술성격으로 인한 복잡성 때문에 실용화를 위해서는 여러가지 문제들이 해결되어야 하겠지만, ER 유체의 무한한 응용성으로 미루어 볼 때 연구개발에 급격한 증대가 기대된다. 따라서 ER 유체 자체개발은 물론 자동차, 항공, 국방, 건설 및 각종 제조산업 분야에서의 응용장치 개발을 통해 창출되는 세계시장 규모가 매우 클 것이라는 것은 쉽게 짐작될 수 있다. 이에 이 기술이 전무 혹은 미약한 국내에서도 하루빨리 연구개발에 착수하여 ER 유체 관련기술의 구축 및 나아가서 국제적 지위권 확보를 꾀해야 할 것으로 사료된다. ER 유체 관련 기술의 광범위성 관계로 치밀한 정부주도 계획하에 체계적이고 합리적인 산·학·연의 적극적인 협조체계를 통해 이루어져야 한다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. C.A. Rogers, D.K. Barker and C.A. Jaeger, "Introduction to Smart Materials and Structures," Proc. of U.S. ARO Workshop, pp. 17-28, 1988.
2. W. Konig, "Bestimmung einiger Reibungscoefficienten und Versuche über den Einfluss der Magnetisierung und Electrification auf die Reibung der Flüssigkeiten", Annals of Physics, Vol. 25, pp. 618-624, 1885.
3. W.H. Winslow, "Induced Fibration Suspensions", J. of Applied Physics, Vol. 20, pp. 1137-1140, 1949.
4. N.G. Stevens, J.L. Sproston and R. Stanway, "An Experimental Study of Electro-Rheological Torque Transmission", ASME J. of Mechanisms, Transmission and Automation in Design, Vol. 110, pp. 182-188, 1988.
5. T.G. Duclos, "Electro-Rheological Fluids and Devices," Automotive Engineering, Vol. 96, pp. 45-48, 1988.
6. M.V. Gandhi, B.S., Thompson and S.B. Choi, "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, 1989.