

ER유체를 이용한 스마트 구조물 시스템의 구성 및 응용



최승복*



홍성룡**

1. 서 론

지진과 같은 외부의 극한 환경조건에 대해 매우 강건한 구조물 혹은 시스템을 설계하고 제어하는 것은 끊임없는 연구의 대상이 되어 왔다. 또한 각종 유연구조물의 경량화 추세에 따라 정확도와 성능 향상이 요구되면서 진동, 소음의 차단, 감소 및 제어를 하기 위한 많은 연구가 진행되어 오고 있다. 이러한 기술의 일환으로 구조물 하부에 고무, 스프링, 댐퍼 등을 부착하여 외부의 진동을 차단하는 제진 또는 면진대, 그리고 구조물 사이에 고무와 같은 점탄성 재료를 삽입 또는 접합하는 샌드위치 형태의 구조물과 박판 적층을 특징으로 하는 복합재료를 이용하는 방법 등이 있다. 제진 또는 면진대는 외부 가진에 대해 완충역할을 하고, 샌드위치 구조물은 점탄성 재료의 히스테리시스 루프 발생에 의해 구조물의 에너지를 감소시켜 진동억제 효과를 얻을 수 있다. 그러나 이러한 방법들은 제작 초기에 미리 외란을 예측하여 공진현상을 피하고, 또한 감쇠효과를 증진시키는 재료 특성을 갖도록 만들어지기 때문에 제작 후에는 재료특성이 고정되어 주파수 및 크기가 변하는 외란에는 능동적으로 대처할 수 없는 수동적 구조물(passive structure)이다. 따라서 내부의 하중조건 변화 혹은 외부의 환경조건 변화 등에 매우 민감하여 구조물과 연계된 시스템의 진동 및 소음이 허용한계를 넘어서거나 갑작스런 대형 파괴를 초래할 수

있다.

이러한 수동적 구조물의 단점을 극복하고 보다 향상된 성능을 얻기 위하여 기존의 금속이나 보합재료 구조물에 연속 또는 분포형의 액튜에이터 및 센서를 접합 또는 삽입함으로써 구조물 자체가 신경계(nerve system), 두뇌계(brain system - microprocessor) 및 근육계(muscle system - host structure and actuator)를 형성하여 구조물 자체가 예측하기 힘든 외란 및 내란에 대하여 지능적으로 유효 적절히 대처할 수 있는 기능을 보유하는 소위 스마트 구조물(smart, intelligent, or adaptive structures)의 출현이 요구되었다.^{1),2)} 현재 이러한 스마트 구조물을 형성하는 매체로서 액튜에이팅 및 센싱 능력을 동시에 갖고 있는 압전재료(piezoelectric material),³⁾ 센싱 능력만을 보유하고 있는 광섬유(optical fiber),⁴⁾ 액튜에이팅 능력만을 보유하고 있는 형상기억합금(shape memory alloy),⁵⁾ 자기유동(magneto-rheological : MR)유체,^{6),7)} 그리고, 전기유동유체(electro-rheological : ER)유체^{8)~16)} 등이 있다.

압전재료는 극전화 현상에 의해 센싱과 액튜에이팅 능력을 동시에 수행하는 능력을 가졌고, 광섬유는 빛의 전성을 특징으로 하여 매우 가볍고 넓은 밴드 폭을 가지고 있다. 또한 구조물과 삽입 및 접합이 용이하여 센서로서 널리 사용된다. 형상기억합금은 온도 변화에 따른 열탄성 마르텐사이트 변태에 의하여 일정한 형상을 기억할 수이 있는 형상기억효과와 특정한 온도 범위

* 인하대학교 기계공학과 교수

** 인하대학교 기계공학과 박사후연구원

내에서 신축할 수 있는 초탄성을 갖는다. 적절한 열의 공급에 의해 기억된 본래의 형상을 다시 찾을 수 있는 형상복귀력과 특정한 구속조건으로부터 발생하는 구속력을 이용하기 때문에 단위 중량당 큰 힘을 발생시킬 수 있으며 구동이 간단하다. MR유체는 부하되는 자기장에 따라 가역적으로 유체자체의 유동을 변화시킬 수 있으므로 시스템 속에 함유하여 효과적인 제어용 액츄에이터로 적용 가능하다. 본 글에서 설명되는 ER유체는 전기장 부하에 의하여 순간적이고 가역적인 상변화를 특징으로 하여 ER유체를 함유한 구조물 자체의 감쇠와 강성을 전기장부하에 의하여 제어할 수 있기 때문에 분포형 액츄에이터로 사용될 수 있다. 또한 ER유체를 이용한 댐퍼나 마운트는 감쇠력을 전기장부하로 조율할 수 있어서 이산형 액츄에이터로서도 사용된다.

본 글에서는 ER유체의 역학적 특성, ER유체를 함유한 분포형 및 이산형 스마트 구조물 시스템의 구성과 응용에 관한 연구 현황과 향후 연구 방향에 대해 살펴보자 한다.

2. ER유체의 특성

ER유체는 가해지는 전기장의 강도에 따라 그 역학적 특성이 변하는 유체를 총칭하는 말로써, 기본적으로 비전도성 용매에 전도성이 강한 입자를 분산시킨 콜로이드 용액이다. 1949년 Winslow⁸⁾가 실리카 입자를 분산시킨 유체에 전기장을 부하하면 전기장의 강도에 따라 유체의 점성이 변함을 처음으로 발표하였다. ER유체는 전기장 무부하 시에는 비전도성 용매에 분산된 입자가 자유로이 운동하는 뉴토니안유체(Newtonian fluid)와 같은 거동을 나타내지만, 전기장 부하 시에는 항복응력을 갖는 빙햄거동(Bingham behavior)을 나타내게 된다. 비전도성 용매에 분산된 입자는 용매와 다른 투과율을 갖고 있어 외부에서 부하되는 전기장에 의해 입자에 분극이 발생되어 국부적으로 다른 전기장을 형성하게 된다. 분극이 발생된 입자는 서로 연결되어 전극을 향하여 고리모양의 체인구조를 형성하게 된다. 전기장 부하 시 전기장 방향으로 형성되는 체인 구조는 입자들의 결합력에 의하여 외부에서 가해지는 전단력에 대해 저항을 갖게 되어, 유체의 유동을 제한할 수 있다. 전기장이 부하되지 않은 경우에는 비전도성 용매에 분산된 입자들이 용매 내에서 자유로이 운동하여 등방향(isotropic)의 역학적 성질을 나타내지만, 전기장 부하 시에는 분산된 전도성 입자가 대전 되어 전극을 향

하여 서로 결합하는 체인형 구조를 형성함으로써 유체의 운동을 제한하여 이방향(anisotropic)의 역학적 성질로 바뀌게 된다. 이러한 체인형 구조는 ER유체를 함유한 구조물 전체의 감쇠와 강성을 증가시키고, ER유체를 이용한 댐퍼나 마운트의 경우에는 감쇠력을 증가시킨다. 전기장에 따른 ER효과를 일으키는 기본메커니즘에 대한 이론에는 이중층(double layer)이론¹⁷⁾과 수분가교(water bridge)이론,¹⁸⁾ 그리고 입자의 분극화(polarization)이론⁹⁾ 등이 있다. 최근에는 입자의 분극화 현상에 의한 연구가 많이 수행되고 있으나, 한가지의 현상만으로는 ER유체의 거동을 설명하기는 어렵다. ER유체 자체에 대한 모델링의 복잡성은 무엇보다도 고체입자의 전기적 성질과 유체 흐름간의 상호작용에 대한 이해 부족에서 기인된다. 일반적으로 ER유체의 상변화를 위해 요구되는 전기장부하의 크기는 ER유체마다 다르지만 약 0.2kV/mm-1.0kV/mm이나 전류밀도는 10A/cm²이 하이드로 상변화를 위해 요구되는 전력은 낮고, 전기장부하에 대한 유체의 반응속도는 수 msec이다.

ER유체는 세 가지 유형으로 여러 장치에 응용될 수 있다.²⁰⁾ 첫 번째 형태는 평행한 두 개의 전극 중 한 쪽의 전극은 고정되어 있고, 다른 한쪽은 회전이나 이동하는 형태로서 전단모드(shear mode) 혹은 회전전단모드(rotational shear mode)라 하며, 유체의 이동과 전극의 움직임이 평행하게 일어나는 보(beam)나 평판(plate)에 ER유체를 함유시킨 분포형 구조물이나 클러치/브레이크 시스템 등에 적용된다.^{14),21)} 두 번째 형태는 두 전극은 고정되어 있고, 고정된 전극 사이로 유체가 이동하는 형태로 유동모드(flow mode)라 하며, 이 형태는 일반적으로 유체가 흐르는 관내에서 유체의 압력변화와 유량 변화가 동시에 일어나며 댐퍼나 마운트에 적용된다.^{22),23)} 세 번째 형태는 유체의 유동과 전극의 움직임이 수직한 방향으로 일어나는 압착모드(squeeze mode)이다. 이 형태는 전극과 유체 사이의 유동이 매우 작을 때 아주 효과적이며, 스퀴즈필름댐퍼나 마운트로 응용될 수 있다.^{24),28)}

ER유체의 거동을 나타내는 구성식은 ER효과 메커니즘을 기초로 하여 일반적으로 전단(shear)의 함수로 표현된다. 댐퍼나 마운트와 같이 전단 변형률이 큰 경우에는 전장 부하 시 빙햄거동(Bingham behavior)을 나타내며, 이를 다음과 같은 전단응력(τ)의 수식으로 표현된다.

$$\tau = \tau_y(E) + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

여기서, $\tau_y(E)$, η , $\dot{\gamma}$ 은 각각 항복전단응력, 점성계수, 전단속도 비를 나타내며 항복전단응력은 전기장(E)에 대한 지수함수로 표현될 수 있다. 한편, 보나 평판 등과 같은 구조물 안에 함유되어 있는 ER유체는 흐름이 없는 걸 상태에서 외란을 받는 경우 전단 변형률은 매우 작아서 점성과 탄성을 동시에 갖게 되며, 이 점탄성 특성은 다음과 같이 복소 전단모듈러스(complex shear modulus : G^*)의 식으로 표현될 수 있다.

$$G^*(\omega, E) = G^s(\omega, E) + iG^l(\omega, E) \quad (2)$$

여기서, $G^s(\omega, E)$ 는 탄성 전단모듈러스로서 전단 변형에 따른 저장된 에너지 정도를 나타내며, ER유체를 함유한 지능구조물의 강성과 연관되며, $G^l(\omega, E)$ 는 손실 전단모듈러스로서 손실된 에너지 정도를 나타낸다. 한편, 손실 전단모듈러스와 탄성 전단모듈러스의 비를 전단 손실계수(shear loss factor)라 하는데, 이는 ER유체를 함유한 지능구조물의 감쇠 특성과 관계된다. ER유체의 빙햄거동이나 전단모듈러스는 ER유체 조성 시 고체입자의 종류 및 크기, 오일의 종류 및 점도, 전체 ER유체에 대한 고체입자가 차지하는 중량비(농도), ER유체 속의 수분 함유량 등에 의하여 큰 영향을 받게 된다.

3. 분포형 스마트 구조물

ER유체가 보나 평판과 같은 구조물 내부에 함유되었을 때에는 구조물의 점탄성 특성인 감쇠와 강성을 전기장에 의해 연속적으로 변화시킬 수 있다. 이러한 특징으로 인하여 ER유체는 유연 구조물의 진동제어를 위하여 분포형 스마트 구조물로서 많은 연구가 수행되어 왔다.^{[12]~[16]} ER유체를 이용한 분포형 스마트 구조물이 다른 스마트 구조물과 근본적으로 다른 것은 유체 영역과 고체영역이 동시에 존재하는 것이다. 그림 1은 ER유체를 이용한 분포형 스마트 구조물의 구성특성, 적층형태의 개념을 나타낸 것으로서, 단층, 다층, 원통 등의 다양한 형태로 구성이 가능하며, 기본적으로 고체의 호스트재료(host material) 사이에 ER유체를 분포시키는 경우가 일반적이다. 구조물 형태는 형상, 경계조건, 작업환경 그리고 성능 요구조건에 따라 다양하고 적절하게 구성될 수 있다. 한편, 스마트 구조물의 구성 시 주요 사항으로는 알맞은 호스트(host) 재료 선정, 적절한 센싱기술(sensing technology) 및 액츄에이팅기술

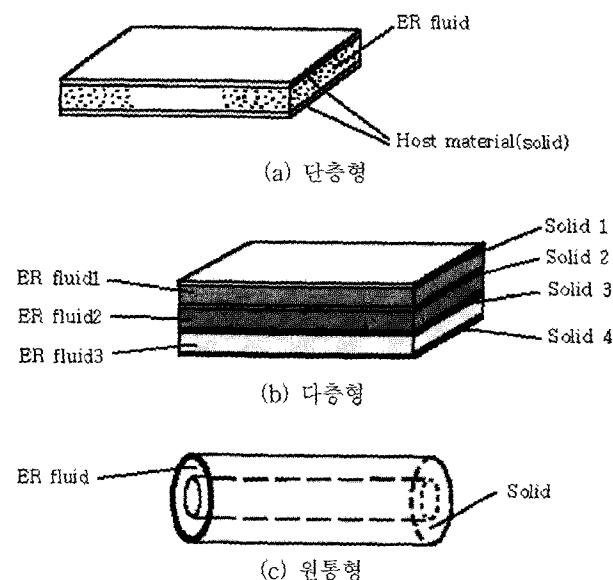


그림 1 ER유체를 이용한 분포형 스마트 구조물

(actuating technology), 그리고 이들을 알맞게 조합하는 구성기술(synthesis technology) 등이 있다.

호스트 재료는 적절한 강도를 갖고 전체 구조물을 지탱 유지하는 역할을 수행한다. 기존의 철, 알루미늄 또는 복합재료가 호스트 재료로서 주로 사용되며, ER유체를 함유할 수 있도록 일정 공간이 존재하는 샌드 위치 형태이다. 그리고, 공간의 형태 및 경계조건은 스마트 구조물 요구 특성에 의하여 다양하게 구성된다. 또한 호스트 재료는 ER유체 영역에 전기장을 부하하는 전극(electrode) 역할도 수행한다. 만약 이 호스트 재료가 절연체인 경우에는 내면에 알루미늄 포일(foil)처럼 전도성이 있는 재료를 접착 혹은 삽입하여 전극으로 사용할 수 있다. 구조물의 출력을 감지하는 센싱 기술로서 광섬유, 압전재료, 스트레인 게이지, 비접촉 변위 측정기, 가속도계 등이 사용된다. 이러한 센서를 구조물에 함유 또는 부착하여 사용할 때, 센서 신호가 ER유체에 부하되는 전기장과 서로 간섭이 발생되지 않도록 주의하여야 한다. 높동 진동제어를 위하여 센서 신호는 마이크로프로세서로 피드백 된 후, 제어신호를 결정하는 것에 적용된다. 센서의 종류, 감도 및 분해능 등은 스마트 구조물의 요구 성능, 경제성, 제어기와의 인터페이스 등을 고려하여 알맞게 선택한다. 마이크로프로세서로부터 결정된 제어신호는 전압증폭기를 통하여 ER유체에 전기장으로 부하되며, ER유체는 전기장 세기에 따라 구조물의 동탄성 특성값을 변화시킴으로써 액츄에이터 역할을 수행한다.

ER유체를 이용한 분포형 스마트구조물의 동적모델

령 방법은 크게 세가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 ER 유체를 함유한 지능구조물 자체를 고체영역과 유체영역으로 된 점탄성 연속체 개념을 도입하여 전체 구조물에 대한 ER유체의 질량비 및 체적비에 따른 점탄성 구성계수(constitutive coefficient)의 기여도를 부여하고, 지능구조물 변형에 따른 저장된 에너지와 손실된 에너지를 특징으로 하는 범함수(functional)을 설정한 후, 변분법(varitional method)을 적용하는 방법이다.¹³⁾ 두 번째는, 현상학적 방법(phenomenological method)로 전기장 부하에 따른 스마트구조물 시스템 동정(identification)을 실험적으로 수행하여 얻은 모달 매개변수를 이용하는 동적 모델링 방법이다.¹⁴⁾ 세 번째는 ER유체를 특징으로 하는 지능구조물이 고무와 같은 점탄성 재료를 ER 유체로 대체한 사실을 바탕으로, 샌드위치 구조물이론과 ER유체 자체의 복소 전단모듈러스를 연계한 동적 모델링 방법이다.^{11),12)} 앞서 기술한 세 가지 방법을 이용하여 ER유체를 이용한 분포형 스마트구조물의 동적 모델을 얻을 수 있다.

그림 2은 ER유체를 분포시킨 스마트 평판을 나타낸 것으로서, 전기장 부하를 통하여 평판의 모드형상과 진동 제어가 가능하다.²⁵⁾ 복합재료 평판에 부착된 네 개의 알루미늄 포일은 ER유체에 독립적으로 전기장을 부하하기 위한 전극역할을 한다. 네 구역은 시계 반대 방향으로 A1, A2, A3, A4로 구분하였다. 그림 3는 전기장 부하 영역에 따른 각 모드의 형상을 나타낸 것으로서, 앞서 설명된 세 번째 모델링 방법을 적용한 후 유한요

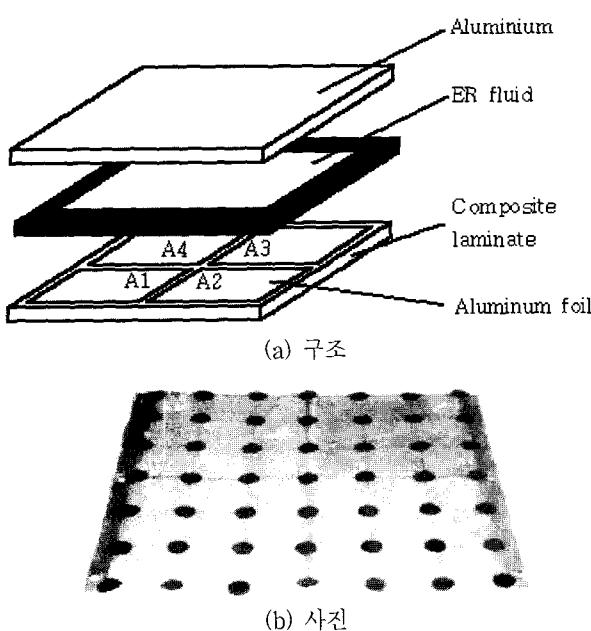


그림 2 ER유체를 이용한 스마트 평판

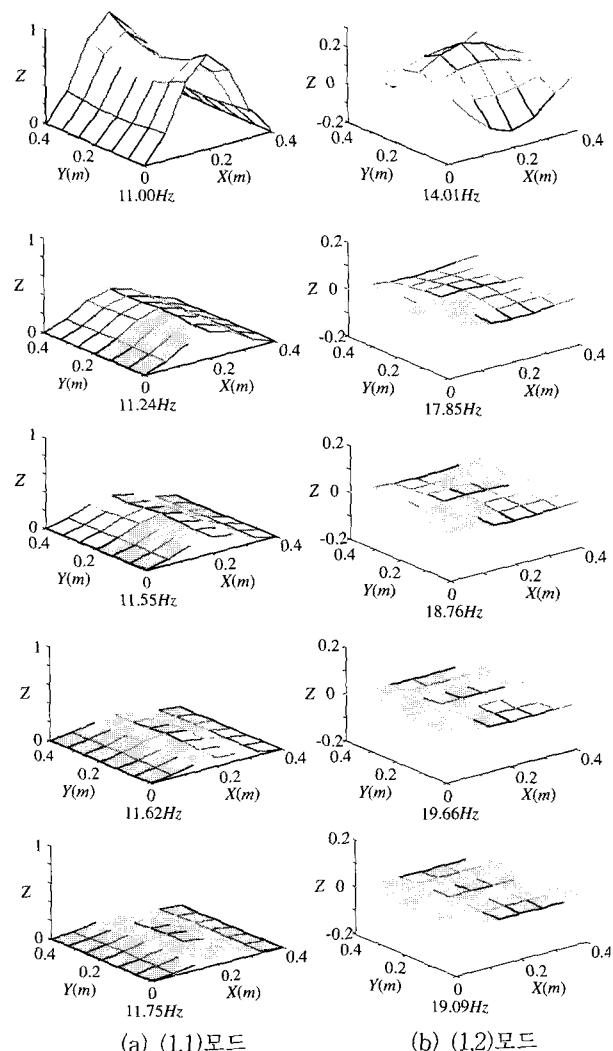


그림 3 ER평판의 모드형상(simulation)

소법을 이용하여 얻은 결과이다. 1kV/mm의 전기장이 부하된 부분은 hatching으로 표시하였다. (1,1), (1,2)모드에서 전기장을 부하하는 구역이 많을수록 모드형상의 크기가 전체적으로 감소하게 되며, 모달주파수가 증가한다. 특히, 특정 구역에만 전기장을 부하함으로써, 특정 부위의 모드형상을 변화시켜 줄 수 있음을 알 수 있다. 전기장의 부하 구역이 많을수록 모달주파수와 모드형상의 변화가 커지며, 전기장을 부하한 구역의 수가 같더라도 부하 위치에 따라 모달특성이 달라진다. 그림 4는 실험을 통하여 얻은 ER평판의 모드형상과 모달주파수를 나타낸 것으로서, 이론적으로 얻은 그림 3의 모드형상과 유사한 결과를 보여주고 있다. 그림 5은 전기장 무부하시 (1,1)모드의 고유 주파수인 11.12Hz로 가진 하였을 경우 전기장 부하 영역에 따른 진동 제어 효과를 나타낸 것이다. 변위는 ER평판의 중앙에서 측정하였으며, 전 영역에 전기장을 부하한 경우가 가장 크

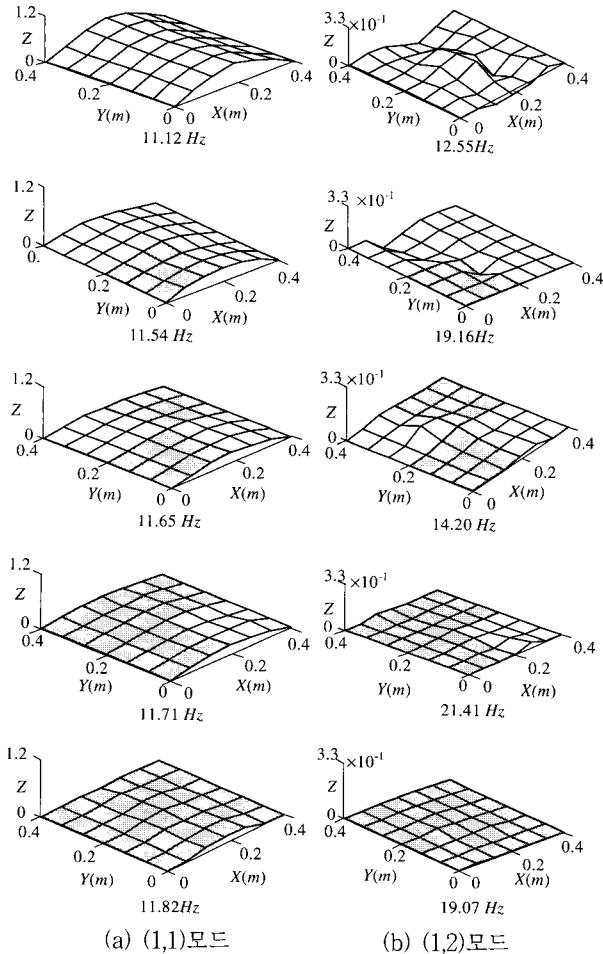


그림 4 ER평판의 모드형상(experiment)

게 진동이 제어됨을 알 수 있다. ER 평판을 이용한 진동제어의 한 응용예로 항공기 날개를 고려할 수 있다. 항공기 날개는 예기치 못하는 기상조건의 변화 및 이착륙 등 복잡한 기능을 수행함에 있어 심한 채터링을 자주 유발하게 되어 항공기 자체의 진동을 발생시킨다. 항공기 날개 속에 각기 다른 특성을 갖고 있는 ER유체를 분포시켜서 각 날개 요소에서 요구되는 성능을 만족시키기 위하여 각 요소에 설치된 센서의 독립적인 능동 피드백된 출력을 바탕으로 전기장을 부하하여 날개 각 요소가 지능적으로 공진현상을 회피하는 스마트날개를 도시한 것이다. 이러한 스마트 날개를 이용하여 승객의 안락감, 조정성 증가 등을 꾀할 수 있을 것이다.

그림 6은 ER평판을 이용한 구조소음제어 시험시스템을 나타낸 것이다.²⁶⁾ 스피커를 이용한 외부 소음원은 ER평판위에 수직으로 작용하도록 하였으며, 이 때 입방체형 음향 공간(cavity) 내에서 마이크로폰으로 음압레벨(sound pressure level)을 측정하여 그림 7에 나타

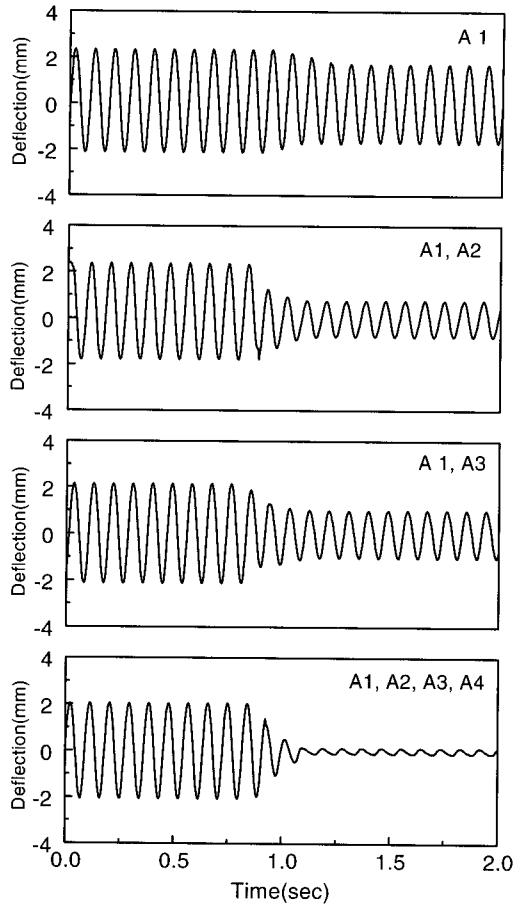


그림 5 ER평판의 진동 응답

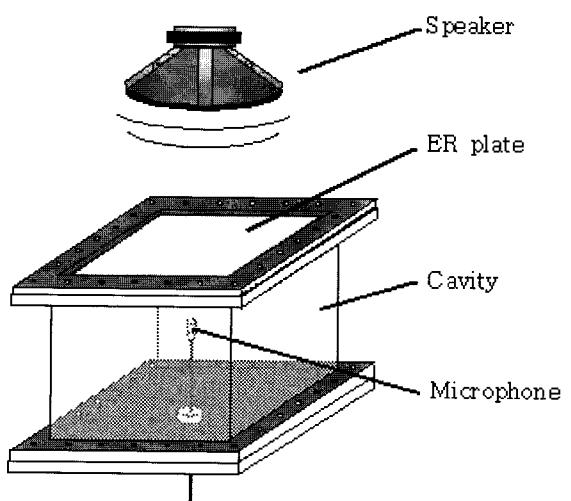


그림 6 ER평판을 이용한 구조소음제어 시스템

내었다. 퍼지제어(fuzzy control)를 이용하여 소음제어를 수행한 경우에 제어를 수행하지 않은 경우보다 효과적으로 음압이 저감된 것을 확인할 수 있다. ER평판을 이용한 구조소음제어는 승용차, 항공기, 선박 등의 실내 소음저감에 활용될 수 있을 것이다.

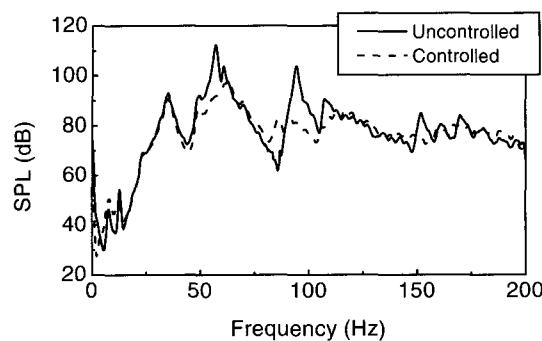
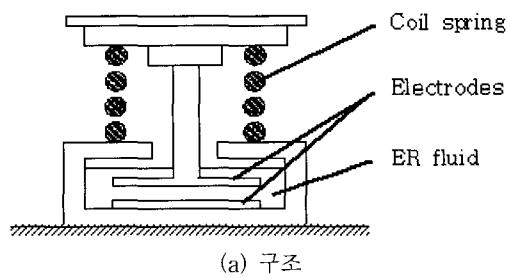


그림 7 ER평판을 이용한 구조소음제어 시스템의 소음응답

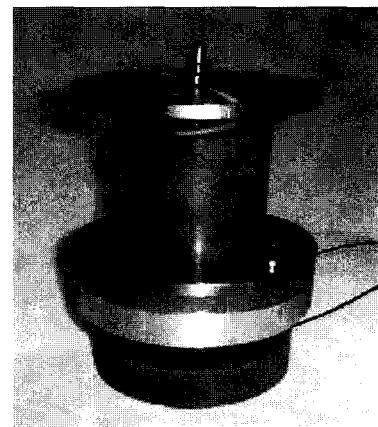
4. 이산형 스마트 구조물 시스템

ER유체가 구조물 소에 함유된 분포형 스마트 구조물 시스템은 힘강도가 작은 구조물의 강성과 감쇠를 전기장에 의해 변화시켜 공진점 근처에서 효과적으로 진동제어를 얻을 수 있지만, ER유체가 자체가 큰 힘이나 모멘트를 발생시키기 못하기 때문에 대형구조물의 실질적인 능동진동제어에 어려움이 따를 수 있다. 이를 극복할 수 있는 방법은 ER유체를 이용하여 댐퍼나 마운트를 구성하여 유연구조물 시스템과 연계시키는 이산형 스마트 구조물을 구축하는 것이다.^{27),28)} ER댐퍼나 ER마운트는 ER유체의 전단변형률이 큰 경우이며 전기장에 따라 항복응력이 지수함수적으로 증가하는 빙햄거동이 지배적이므로, 전기장부하를 통하여 감쇠력을 적절히 조절할 수 있다. 구조물의 진동을 제어하는 경우, 구조물의 제어모드를 선정하고, 각 모드에서의 모드형상을 고려하여 구조물에 다수의 ER마운트 또는 수동형 마운트와 함께 설치한 후, 진동제어 알고리즘으로부터 얻은 요구댐핑력에 상응하는 전기장을 ER마운트에 부하함으로써 효과적인 진동제어를 수행할 수 있다.

그림 8는 ER유체의 압착모드를 이용한 ER마운트의 구조를 나타낸다.²⁹⁾ 외부 진동에 의하여 상대운동하는 두 전극(electrode), 구조물의 정하중 지지를 위한 스프링, 전극 간극에 충진되어 있는 ER유체로 구성되어 있다. 전극의 상대운동에 의하여 ER유체는 전극 사이를 압착유동하게 되며, ER마운트는 전기장 무부하 시에는 ER유체의 기본접선에 의한 압착유동저항으로부터 발생되는 댐핑력 만을 얻지만, 전기장 부하 시에는 ER유체의 항복응력 증가에 의한 가변댐핑력을 발생시킨다. 그림 9는 압착모드형 ER마운트를 이용한 유연구조물의 진동제어 시스템을 나타낸다. 2개의 ER마운트(②, ⑤)와 4개의 스프링마운트(①, ③, ④, ⑥)를 프레임구조물의 하단에 설치하여, 프레임에 가해지는 외란에 의한



(a) 구조



(b) 사진

그림 8 압착모드형 ER마운트

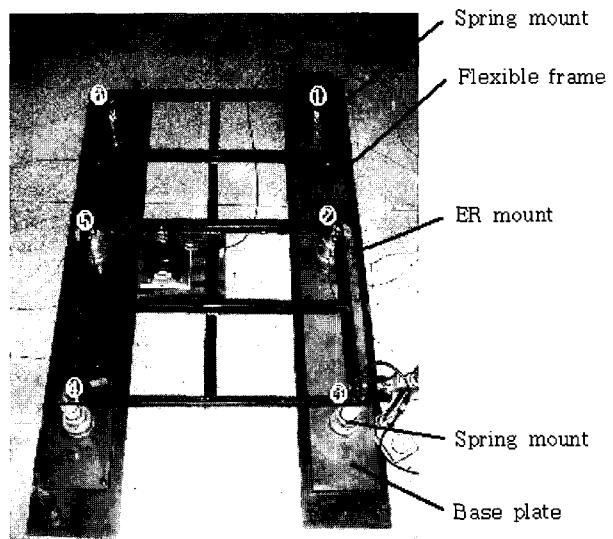


그림 9 ER마운트를 이용한 프레임 구조물의 진동제어 시스템

프레임의 진동을 제어하였다. 그림 10은 ①, ②, ③위치에서 프레임의 가속도를 측정하여 나타낸 것이며, 최적제어 알고리즘 적용 시 가속도가 전체적으로 감소하였다. 특히, 공진주파수 대역에서 진동이 효과적으로 감소되었다. ER마운트의 가변 댐핑력을 이용하여 프레임구조물의 진동이 효과적으로 저감되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 ER유체를 이용한 댐퍼나 마운트는 대형 건축구조물, 우주구조물, 항공구조물, 함정구조물 등 지지

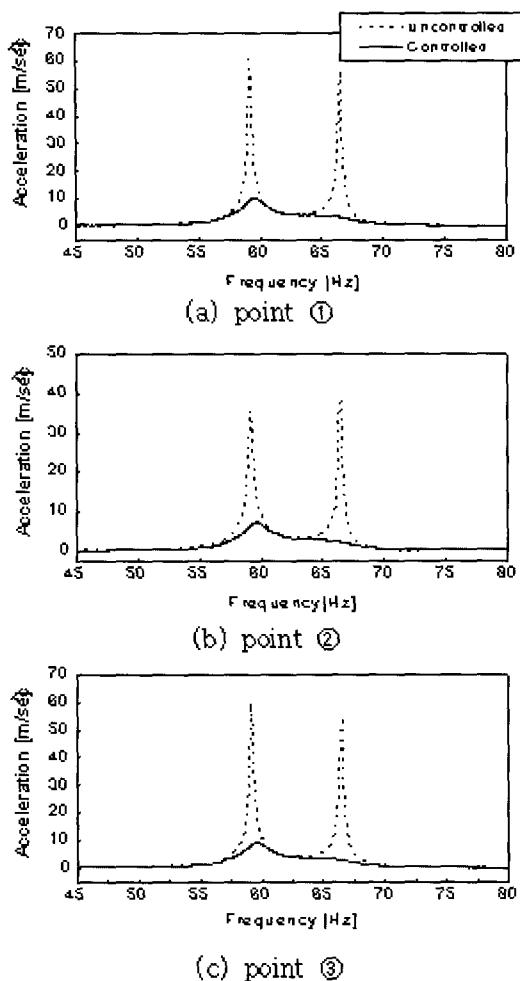


그림 10 ER마운트를 이용한 프레임 구조물의 진동 응답

점을 가지고 큰 힘을 지탱해야 하는 각종 구조물의 진동제어에 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

5. 맺음말

본 글에서는 ER유체를 이용한 스마트구조물의 구성과 ER유체의 역학적특성, 스마트구조물의 구성방법, 동적모델링과 모드형상, 진동, 소음 제어로의 응용성에 대하여 살펴보았다. ER유체를 이용한 스마트 구조물 응용기술은 기계, 항공, 건축, 토목 등의 분야와 관련된 무한한 잠재력과 다양한 응용성을 가지고 있으며, 상당히 매력적인 연구분야이다. 그러나, 여러 구성 및 응용 기술의 실용화를 위해서는 시스템의 구성 요소 분야별로 해결해야 할 연구과제 들이 있다. 특히, 액츄에이팅을 수행하는 ER유체 자체의 내구성 문제로서 고온에서 ER효과하락과 장시간 사용 시 ER유체입자의 마멸, 고체입자의 침전에 의한 초기 상태불안정 등이 있다. 이러한 기존 ER유체의 단점을 효과적으로 보완할 수

있는 진보된 ER유체 조성과 시스템 설계가 요구된다. 그리고, 센서기술 분야에서는 호스트 재료에 보다 쉽게 결합이 되고 여러 가지 형태의 요구조건을 만족시킬 수 있으며 외부 환경조건에 강건한 다양한 센서개발이 요구된다. 또한, 보다 일반적인 동적 모델링을 통하여 적용 시스템에 적합하고 강건한 제어기에 대한 연구가 진행되어야 한다. 능동제어기를 실제로 구현하기 위한 센서의 설치, 센서신호 처리, 폐회로 피드백 시스템 장착, 상호 인터페이스 등의 기술 발전이 요구되며, 아울러 보다 효율적인 시스템의 성능특성을 실현할 수 있는 설계메카니즘연구가 필요하다. 따라서, ER유체를 이용한 스마트 구조물 시스템의 개발은 어느 한 분야에서만 아니라 기계, 전기전자, 항공, 건축, 토목, 물리, 고분자, 화학 등 통합형식으로 발전되어야 한다. 미국, 일본을 비롯한 여러 선진국에서 ER유체를 이용한 스마트 구조물에 대한 연구를 꾸준히 수행하는 것은 자동차, 항공, 제조, 선박, 건축 등 각종 산업분야에서 독창적인 국가 기술 경쟁력 확보를 위해서이다.

References

1. Gandhi, M. V. and Thompson, B. S., "Smart Materials and Structures," London : Chapman & Hall, 1992
2. Rogers, C. A., Baker, K. D. and Jaeger, C. A., "Introduction to Smart Materials and Structures," Proc. of U.S.A. ARO Workshop, 1988, pp.17~28
3. Crawley, E. F. and De Luis J., "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures," AIAA Journal, Vol. 25, No. 10, 1987
4. Claus, R. O., McKeeman, J. C., May, R. G. and Bennet, K. D., "Optical Fiber Sensors and Signal Processing for Smart Materials and Structures Applications," Proc. of U.S.A. ARO Workshop, 1988, pp.29~38
5. Rogers, C. A., "Active Vibration and Structural Acoustic Control of Shape Memory Alloy Hybrid Composites : Experimental Results," Journal of Acoustical Society of America, Vol. 88, No. 6, 1990, pp.2803~2811
6. Böltter, R. and Janocha, H., "Design Rules for MR Fluid Actuators in Different Working Modes," Proc. of SPIE, Vol. 3045, 1997, pp.148~159
7. Böltter, R. and Janocha, H., "Performance of

- Long-Stroke and Low-Stroke MR Fluid Dampers," *Proc. of SPIE*, Vol. 3227, 1998, pp.303~313
8. Winslow, W. M., "Induced Fibration Suspensions," *Journal of Physics Technology*, Vol. 20, No. 12, 1949, pp.1137~1140
 9. Block, H. and Kelly, J. P., "Electro-rheology," *Journal of Physics D : Applied Physics*, Vol. 21, 1988, pp.290~296
 10. Seed, M., Hobson, G. S. and Tozer, R. C., "Macroscopic Behavior of ER Fluid," *Proc. of the 2nd International Conference on ER Fluids*, 1990, pp.214~230
 11. Korobko, E. V. and Shulman, Z. P., "Viscoelastic Behavior of Electrorheological Fluids," *Proc. of the 2nd International Conference on ER Fluids*, 1989, pp.3~26
 12. Park, Y. K., Choi, S. B. and Cheong, C. C., "Dynamic Modeling and Vibration Control of Smart Structures Incorporating Electro-Rheological Fluids", *Fifth International Conference on Adaptive Structures*, 1994, pp.228~237
 13. Gandhi, M. V., Thomson, B. S. and Choi, S. B., "A New Generation of Innovative Ultra-Advanced Intelligent Composite Materials Featuring Electro-Rheological Fluids; An Experimental Investigation," *Journal of Composite Materials*, Vol. 23, No. 12, 1989, pp.1232~1255
 14. Choi, S. B., Park, Y. K. and Kim, J. D., "Vibration Characteristics of Hollow Cantilevered Beams Containing an Electro-Rheological Fluid," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 35, No. 9, pp.757~768, 1993
 15. Choi, S. B., Park, Y. K. and Suh, M. S., "Elastodynamic Characteristics of Hollow Cantilever Beams Containing an Electro-Rheological Fluid: Experimental Results," *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 2, 1994, pp.438~440
 16. Choi, S. B. and Park, Y. K., "Active Vibration Control of a Cantilever Beam Containing an Electro-Rheological Fluid," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 172, No. 3, 1994, pp.428~432
 17. Klass, D. L. and Martineck, T. W., "Electroviscous Fluids. I. Rheological Fluids," *Journal of Applied Physics*, Vol. 38, No. 1, 1967, pp.67~75
 18. Klass, D. L. and Martineck, T. W., "Electroviscous Fluids. II. Rheological Fluids," *Journal of Applied Physics*, Vol. 38, No. 1, 1967, pp.75~80
 19. Stangroom, J. E., "Electrorheological Fluids," *Physics Technologies*, Vol. 14, 1983, pp.290~296
 20. Stanway, R., Sproston, J. L. and El-Wahed, A. K., "Application of Electro-rheological Fluids in Vibration Control: A Survey," *Smart Materials and Structures*, Vol. 5, 1996, pp.464~482
 21. Choi, S. B., Han, S. S., Kim, H. K. and Cheong, C. C., "H ∞ Control of a Flexible Gantry Robot Arm Using Smart Actuators," *Mechatronics*, Vol. 9, No. 3, 1999, pp.271~286
 22. Petek, N. K., Romstadt, D. J., Lizell, M. B. and Weyenberg, T. R., "Demonstration of an Automotive Semi-active Suspension Using Electrorheological Fluid," SAE Technical Paper Series 950586, 1995.
 23. Duclos, T. G., "An Externally Tunable Hydraulic Mount Which Uses Electro-Rheological Fluid," SAE Technical Paper Series 870963, 1987
 24. Stanway, R., Sproston, J. L., Rigby, S. G. and Williams, E. W., "Modeling and control of electro-rheological fluids in the squeeze-flow mode," *Proceedings of the Second International Conference on Intelligent Materials*, 1994, pp.1176~1184
 25. Choi, S. B., Park, Y. K. and Jung, S. B., "Modal Characteristics of a Flexible Smart Plate Filled With Electrorheological Fluids," *AIAA Journal of Aircraft*, Vol. 36, No. 2, 1999, pp.458~464
 26. Choi, S. B., Seo, J. W., Kim, J. H. and Kim, K. S., "Electrorheological Fluid-Based Plate For Noise Reduction In a Cabin: Experimental Results," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 239, No. 1, 2001, pp.178~185
 27. Choi, S. B., "Vibration Control of a Flexible Structure Using ER Dampers," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 121, No. 9, 1999, pp.134~138
 28. Hong, S. R., Choi, S. B. and Han, M. S., "Vibration Control of a Frame Structure Using Electrorheological Fluid Mounts," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 44, No. 10, 2002, pp.2027~2045