

# 전기유동유체(ERF)를 이용한 지능구조물 시스템의 구성 및 응용

최 승 복 · 박 용 군

(인하대학교 기계공학과)

## 1. 머리말

지진과 같은 외부의 극한 환경조건에 대해 매우 강건한 구조물 혹은 시스템을 설계하고 제어하는 것은 끊임없는 연구의 대상이 되어왔다. 또한 로봇 및 구조물의 고속운전과 에너지 절약을 위한 구조의 경량화, 그리고 피할 수 없는 대형 유연구조물의 경량화 추세에 따라 정확도와 성능 향상이 요구되면서 진동, 소음의 차단, 감소 및 제어를 하기 위한 많은 연구가 진행되어 오고 있다. 대표적인 예로, 구조물 하부에 고무, 스프링, 댐퍼 등을 부착하여 외부의 진동원을 차단하는 제진 또는 면진대, 그리고 구조물 사이에 고무같은 점탄성 재료를 삽입 또는 접합하는 샌드위치 형태의 구조물과 박판 적층을 특징으로 하는 복합재료를 이용하는 방법 등이 있다. 제진 또는 면진대는 외부 가진에 대해 완충 역할을 하기 때문에 고정밀도 계측 장비 또는 조립 테이블에 널리 사용되고 있다. 샌드위치 구조물은 상하운동에 따른 점탄성 재료의 히스테리시스 루프 발생에 의해 구조물의 에너지를 감소시켜 진동억제 효과를 얻을 수 있다. 한편, 복합재료는 기존의 철이나 알루미늄 보다 중량대 강성비가 높고, 진동에너지를

빠른 분산으로 높은 감쇠효과를 지니고 있다. 따라서 피로수명도 우수할 뿐만 아니라 같은 두께에 대해 박판 적층각도를 조정함으로써 방향에 따라 강성을 자유롭게 변화시킬 수 있으므로 재료의 효과적 사용이 가능하여 항공기 부품, 자동차 및 선박 구조물, 로봇 산업등 여러분야에서 활발히 사용되고 있다. 그러나 이런 방법들은 제작 초기에 미리 외란을 예측하여 공진 현상을 피하고 또한 감쇠 효과를 증진시키는 재료 특성을 갖도록 만들어지기 때문에 제작 후에는 재료 특성이 고정되어 주파수 및 크기가 변하는 외란에는 능동적으로 대처할 수 없는 일종의 수동적 구조물(passive structures)이다. 따라서 내부의 하중조건 변화 혹은 외부의 환경조건 변화등에 매우 민감하여 구조물과 연계된 시스템의 갑작스런 대형 파괴를 초래할 수 있다.

이런 단점을 극복하고 보다 향상된 성능을 얻기 위해 기존의 금속이나 복합재료 구조물에 연속 또는 분포형의 액추에이터 및 센서를 집합 혹은 삽입함으로써 구조물 자체가 신경계(nerve system-sensor), 두뇌계(brain system-microprocessor) 및 근육계(muscle system-host structure and actuator)를 형성하여 구조물 자체가 예측하기 힘든 외란 및 내란에

대해 지능적으로 유효 적절히 대처할 수 있는 기능을 보유하는 소위 지능구조물(intelligent, smart, or adaptive structures)의 출현이 요구되었다<sup>(1,2)</sup>. 한편, 그림 1에서 나타내는 바와 같이 지능구조물은 상징적으로 인간과 비유될 수 있는데 감각 신경계를 통해 내부 및 외부의 자극과 현상을 느끼듯, 구조물에 접합 혹은 삽입된 센서는 내·외란과 응답을 감지한다. 두뇌계가 신경계를 통해서 얻은 정보를 바탕으로 판단하고 지시하는 것처럼, 센서 신호를 바탕으로 마이크로 프로세서와 제어 알고리즘이 연계하여 구조물 자체가 판단한 후 알맞은 조치를 취할 수 있도록 제어 신호를 발생한다. 그리고, 근육계가 몸을 지탱하고 두뇌계에서 주어진 명령에 따라 구체적인 동작을 수행하듯이, 액추에이터는 마이크로 프로세서에서 보내진 제어 입력에 따라 작동을 한다. 현재 이러한 지능구조물을 형성하는 매체로서 액추에이팅 및 센싱능력을 동시에 갖고 있는 압전재료(piezoelectric materials)<sup>(3)</sup>, 센싱 능력만을 보유하고 있는 광섬유(optical fiber)<sup>(4)</sup>, 액추에이팅 능력만을 보유하고 있는 형상기억합금(shape memory alloy)<sup>(5)</sup>과 전기유동유체(ERF: electro-rheological fluids)<sup>(6~9)</sup> 등이 있다.

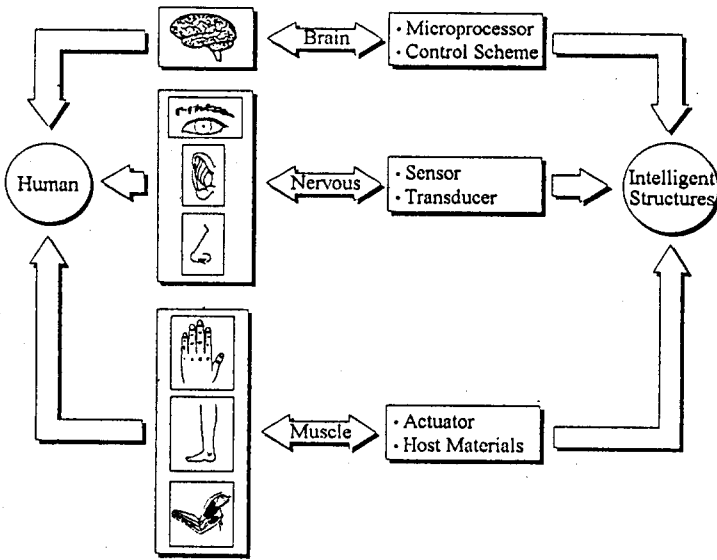


그림 1 지능구조물의 개념도

잘 알려진 바와 같이 압전재료는 압전효과인 극전화 현상에 의해 센싱과 액추에이팅을 동시에 수행하는 능력을 가졌고, 광섬유는 빛의 전송을 특징으로 하여 매우 가볍고 넓은 밴드 폭을 가지고 있다. 또한 구조물과 삽입 및 접합이 용이하여 센서로서 널리 사용된다. 형상기억 합금은 특정한 형상을 기억했다가 적절한 열의 공급에 의해 기억된 본래의 형상을 다시 찾을 수 있는 복원 능력을 지니고 있다. 이런 형상복귀력과 특정한 구속조건으로부터 발생하는 구속력을 이용하여 구조물의 모드(mode) 형태를 변하시켜서 진동제어를 수행하는 액추에이터로 사용된다. 본 글에서 설명되는 ERF는 전장 부하에 의한 순간적이고 가역적인 상변화를 특징으로 하여 ERF를 함유한 구조물 자체의 감쇠, 강성을 전장부하에 의해 제어할 수 있기 때문에 ERF는 아주 매력적인 분포형 액추에이터로서 사용된다. 또한 ERF를 이용한 댐퍼는 댐핑력을 전장부하로 조율(tuning)할 수 있어 이산형 액추에이터로서도 사용된다.

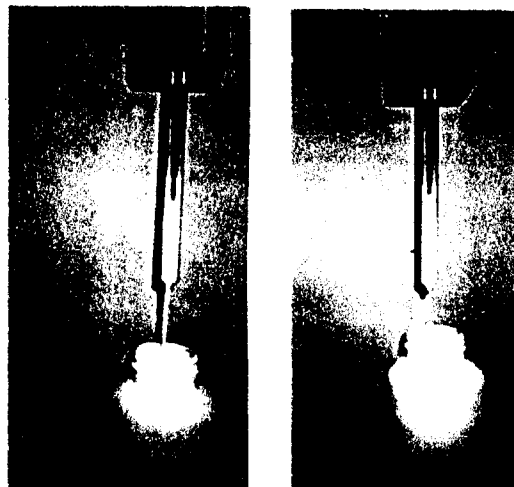
본 글에서는 지능구조물의 개념

설명과 더불어 ERF의 특성, ERF를 함유한 지능구조물 시스템의 구성, 동적 모델링과 진동제어, 그리고 그 응용성에 관한 연구 현황과 방향에 대하여 살펴 보고자 한다.

## 2. ERF의 특성

전장부하에 영향을 받는 유체의 발견은 100여년전 독일에서 처음 보고 되었으며, 1947년 미국의 Winslow가 미세한 고체입자인 녹

말가루와 광물성 기름을 혼합하여 만든 불용해성의 유체에 약 3kV/mm의 전장부하 시 유체저항이 현저히 증가하는 현상을 보고할 때까지는 그 중요성이 인식되지 못했다<sup>(7)</sup>. Winslow는 인가된 전장부하가 유체의 점성을 증가시킨다고 가정했고 따라서 그 물질을 'electroviscous fluid'라고 이름 지었다. 그러한 유체의 잠재적 가치는 즉시 인식되었고 많은 회사들이 Winslow가 보고한 물질 중에서 가장 효과가 좋은 실리카겔형의 유체를 이용한 가진기(vibrator) 및 가변 제어형 댐퍼 개발을 시도했다. 그러나 실리카겔형 유체의 큰 마멸성 때문에 의욕에 넘치던 모든 시도는 수포로 돌아갔으며, 1980년경 영국에서 이 유체에 대한 연구가 다시 시작될 때까지 이 분야에 대한 연구는 매우 취약했다. 초기 이 유체에 대한 해석은 유체에 전장 부하 시 일어나는 유동변화의 이해부족으로 많은 문제점을 던져 주었다. 예를 들어 전장부하에 의해 유체의 점성변화만이 발생한다는 생각은 잘못된 인식이었다. 일반적으로 전장 무부하 시 두 판 사이의 ERF는 일반 점성유체와 매



(a) 0.0 kV/mm

(b) 1.0 kV/mm

그림 2 ERF의 상변화 특성

우 흡사한 운동을 하나 전장부하가 인가되면 그 운동은 건조한 판에서 일어나는 현상과 같다. 즉 건조한 두판을 누르는 힘의 증가에 따라 운동을 시작하고 유지하기 위한 힘이 증가한다. 따라서 Winslow가 보고한 유체에 있어서의 유체 저항의 변화가 점성 증가에만 있다고 한 가정은 잘못된 것이며 용어 또한 'electroviscous'보다는 현재 널리 사용되고 있는 'electrorheological'이 더욱 적절한 표현이 된다.

대부분의 ERF는 전도성의 고체 입자, 절연성의 기본 오일용매 그리고 ER효과를 향상시키기 위한 첨가제 등으로 이루어져 있다. 그리고 외면상 가장 두드러진 현상은 그림 2에서 나타내는 바와 같이 전장 무부하 시 액체상태가 되어 흘러 내리다가 전장부하를 인가하면 고체상태로 상변화하여 흘러 내리지 않는 것이다. 그림 3은 이러한 현상을 보다 미시적 관점에서 나타낸 것으로서 전극의 전하와 ERF 고체입자의 전하 사이에 어떻게 해서 이러한 변화가 일어날 수 있는가 보여준다. 전장무부하 시에는 그림에서 보는 바와 같이 고체입자의 전하는 양극 혹은 음극이 될 수 있으며 자유로이 이 운동을 하여 유체는 등방향 물리적 및 기계적 성질을 띄게 된다. 그러나 전장부

하 시에는 고체입자의 전하는 체인형 구조를 형성하게 되어 유체의 운동을 제한하고 유체 자체의 모든 유동성질을 변화시킨다. 한편, 이 유체가 구조물 속에 함유될 때 체인구조는 구조물의 강성과 감쇠를 증가시킨다. 그리고, 전장 무부하 상태로 되면 고체입자는 다시 본래의 랜덤 구조를 갖게 된다. 일반적으로 ERF의 상변화를 위해 요구되는 전장부하의 크기는 ERF마다 다르지만 약 1~3.0 kV/mm(유체 두께)이나 전류 밀도(current density)가 약  $10\mu\text{A}/\text{cm}^2$  이하이기 때문에 상변화를 위해 요구되는 전력은 매우 낮고 전장부하에 대한 유체의 반응 속도는 5ms이하이다. 이러한 우수한 특성 때문에 지능구조물을 비롯하여 여러 응용장치에 적용될 수 있다.

많은 연구가들에 의해 ERF 메카니즘에 대한 여러가지 이론과 모델이 제안되고 있으나 지금까지 이렇다할 만한 획기적인 구체적이고 정략적인 해석은 나오지 않고 있으며 의견조차 분분한 실정이다. 이와 같이 ERF 자체에 대한 모델링의 복잡성은 무엇보다도 고체입자의 전기적 성질과 유체 흐름간에 상호작용에 대한 이해 부족에서 기인된다. 그러나, 일반적으로 ER유체의 거동을 나타내는 구성식은 ER효과 메카니즘을 기초로 하여

전단(shear)의 함수로 표현된다. 전단 변형률이 클 경우에는 전장부하시 빙햄거동(Bingham behavior)을 나타내며 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\tau = \tau_0(\dot{\gamma}) + \eta\dot{\gamma} \quad (1)$$

여기서,  $\tau_0(\dot{\gamma})$ ,  $\eta$ ,  $\dot{\gamma}$ 은 각각 항복 전단응력, 점성계수, 전단속도비를 나타내며 항복 전단응력은 전장부하( $\dot{\gamma}$ )에 대해 지수 함수적으로 증가한다.

한편, 보(beams)나 평판(plates) 등과 같은 구조물 안에 함유되어 있는 ERF는 흐름이 없는 쥘 상태에서 외란을 받는 경우 전단 변형률은 매우 작아서 탄성과 점성을 동시에 갖는 점탄성을 띄게 되며, 이 점탄성 특성은 다음과 같이 복소 전단모듈러스[complex shear modulus:  $G^*(\omega, \dot{\gamma})$ ] 식으로 표현된다.

$$G^*(\omega, \dot{\gamma}) = G^s(\omega, \dot{\gamma}) + iG^l(\omega, \dot{\gamma}) \quad (2)$$

여기서,  $G^s(\omega, \dot{\gamma})$ 는 탄성 전단모듈러스로서 전단 변형에 따른 저장된 에너지 정도를 나타내며, ERF를 함유한 지능구조물의 강성과 연관이 되고,  $G^l(\omega, \dot{\gamma})$ 은 손실 전단모듈러스로서 손실된 에너지 정도를 나타낸다. 한편, 손실 전단모듈러스와 탄성 전단모듈러스의 비를 전단 손실계수(shear loss factor)라 하는데, 이는 ERF를 함유한 지능구조물의 감쇠 특성과 관계된다.

### 3. ERF를 이용한 지능 구조물의 구성

ERF를 이용한 지능구조물이 다른 지능구조물과 근본적으로 다른 것은 유체영역과 고체영역이 함께 존재하는 것이다. 따라서, 지능구조물 구성시 유체를 함유할 수 있는 공간을 반드시 고려해야 한다.

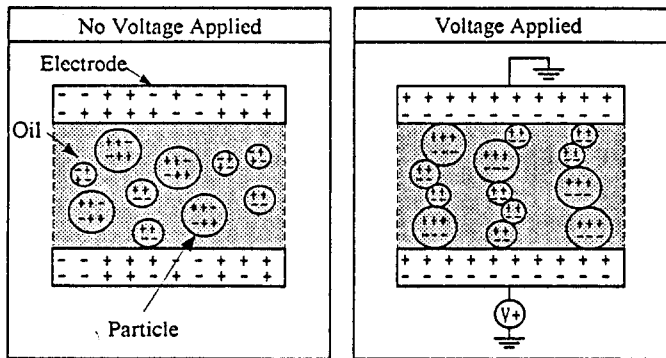


그림 3 ERF의 마이크로메카니즘

그림 4는 ERF를 이용한 지능구조물의 구성특성과 적층형태의 지능구조물을 나타낸다. 물론 구조물 형태는 형상, 경계조건, 작업환경 그리고 성능 요구조건에 따라 매우 다양하고 적절하게 구성될 수 있다. 한편 지능구조물의 구성시 주요 사항으로는 알맞은 호스트(host)재료 선정, 적절한 센싱기술(sensing technology) 및 액추에이팅 기술(actuating technology), 그리고 이들을 조합하는 알맞은 제작기술(synthesis) 등이 있다.

지금까지 알려진 각 구성요소에 대한 기술을 요약 정리하면 다음과 같다. 호스트 재료는 강도를 갖고 전체 구조물을 지탱 유지하는 역할을 수행한다. 기존의 철, 알루미늄 또는 복합재료가 호스트 재료로서 사용되며 ERF를 함유할 수 있도록 일정 공간이 존재하는 샌드위치 형태이다. 그리고, 공간의 형태 및 경계조건은 지능구조물 요구 특성에 의해 다양하게 구성된다. 또한 ERF 영역에 전장부하를 인가하는 전극(electrode) 역할도 수행한다. 만약 이 호스트 재료가 절연체인

경우에는 내면에 알루미늄 포일처럼 전도성이 있는 재료를 접착 혹은 삽입하여 전극으로 사용한다.

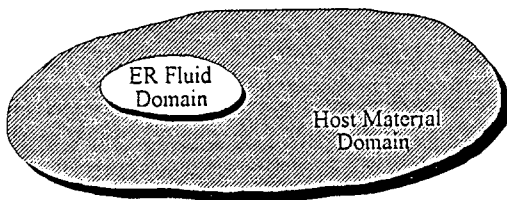
구조물의 출력을 감지하는 센싱 기술로서 광섬유, 압전 재료, 스트레인 게이지, 비접촉 변위 측정기 등이 사용된다. 능동 진동제어를 위해 센서신호는 A/D변환기를 통해 마이크로 프로세서로 피드백된 후 제어신호를 결정하는 데 적용된다. 센서의 종류, 감도 및 분해능 등은 지능구조물의 요구성능, 경제성, 제어기와의 인터페이스 등을 고려하여 적절히 선택한다. 한편, 이 센서 재료를 구조물에 함유 또는 접착하여 사용할 때, 센서 신호가 ERF에 인가되는 전장부하와 서로 간섭이 발생되지 않도록 주의해야 한다. 한편, ERF는 기존의 액추에이터처럼 힘 또는 모멘트를 발생시키지 않고 다만 구조물 속에 함유되어 전장부하에 따라 구조물의 동탄성 특성값을 변화시킴으로써 액추에이터 역할을 수행한다. 따라서, ERF 조성시 고체입자의 종류 및 크기, 오일의 종류 및 점도, 전체 ERF에 대한 고체입자가

차지하는 중량비(농도), ERF속의 수분 함유량, 또한 지능구조물 전체에 대한 ERF가 차지하는 체적비 등은 전장부하에 따른 구조물 동탄성 변화값, 즉 액추에이팅 제어폭에 영향을 주는 중요한 매개변수 역할을 한다.

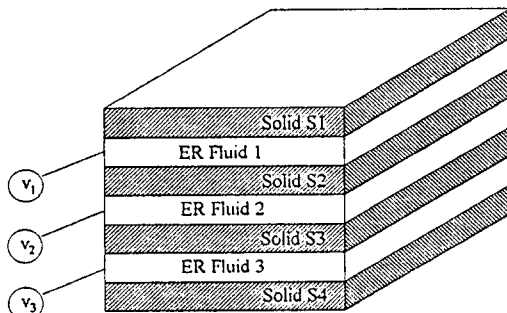
설정된 호스트재료 사이에 실리콘 고무(절연체)등을 접착하여 ERF를 함유할 수 있는 공간을 형성하는데 적절한 접착제와 지그를 사용하여 유체가 흘러 나오지 않도록 잘 접착한 후, 경화를 확실하게 한다. 전극형태는 함유된 모든 ERF에 전장부하를 인가할 수 있도록 제작되어야 하고 높은 전장부하가 전극을 통해 인가되므로 전극 사이의 절연성 검사를 반드시 수행한 후, 최종적으로 주사기와 같은 도구를 사용하여 ERF를 구조물 공간에 가득히 채운다. 한편, 적용되는 장치 및 시스템에 따라 강성 및 감쇠변화, 정착시간 등 요구 특성 및 성능이 다르기 때문에, 이를 만족시키기 위한 ERF, 호스트 재료, 센싱 및 액추에이팅 기술, 제어전략 등의 각 요소에 대한 적절한 도입이 필요하다. 그림 5는 지금까지 알려진 각 요소에 대한 주요 기술과 알맞은 지능구조물을 구성하는 흐름도를 나타낸다.

#### 4. 동적 모델링 및 진동제어

ERF를 함유한 지능구조물의 강성 및 감쇠 특성을 외부에서 인가하는 전장부하에 의해 자유로이 조절할 수 있기 때문에 관련 연구자들에게 많은 흥미를 끌었다. 그러나 이에 대한 연구는 초기 단계로서 주로 실험을 통한 현상학적 측면에서만 이루어져 지능구조물에 대한 정확한 정적 및 동적 모델링, 그리고 능동 제어기 설계 및 실험적 구현 등이 정립되지 않은 상태



(a) 구성개념



(b) 적층형태

그림 4 ERF를 삽입한 지능구조물

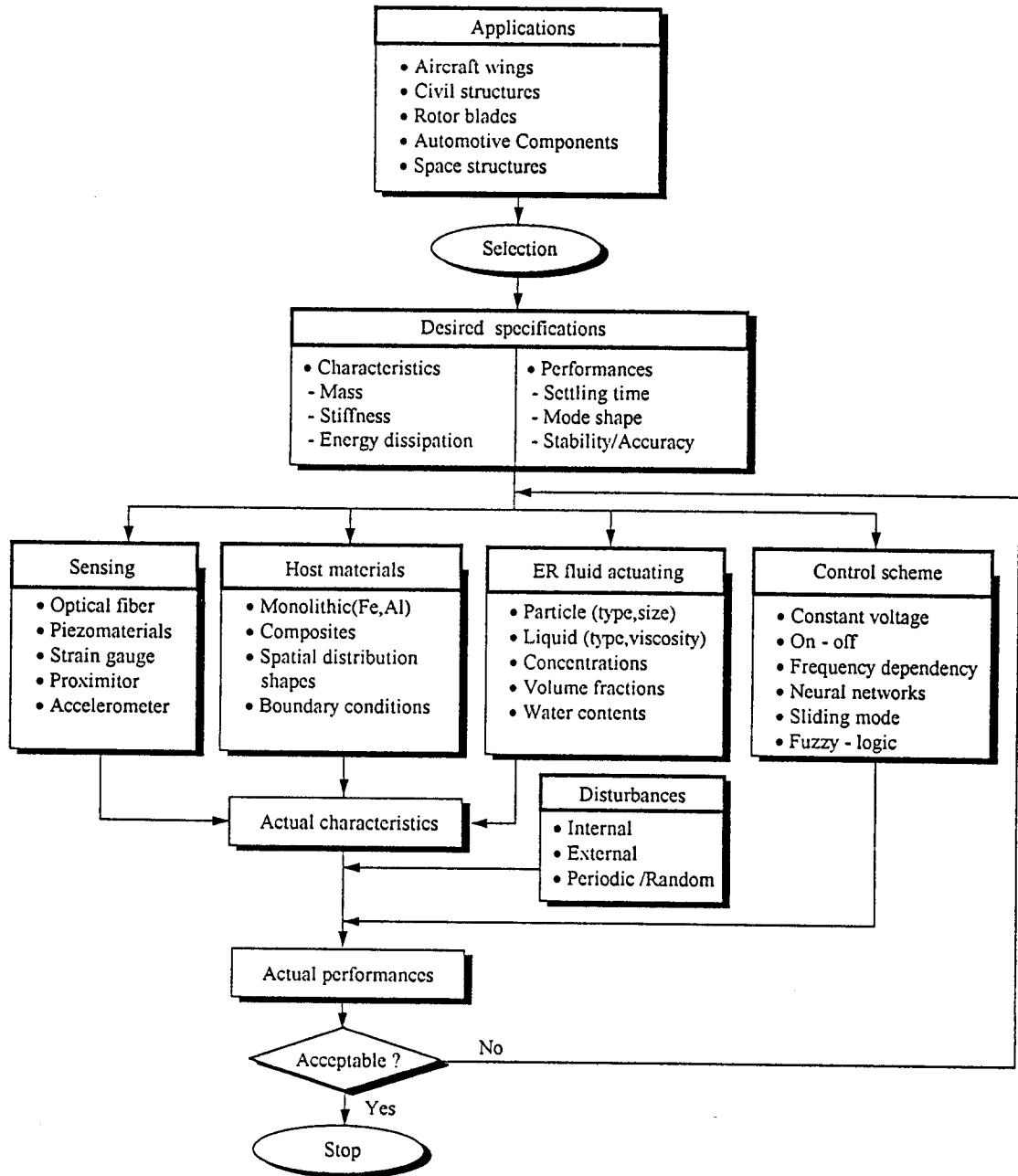


그림 5 ERF를 이용한 지능구조물의 구성 흐름도

이다. 이는 ERF 자체의 복잡한 메카니즘과 더불어 구조물과의 결합에서 발생하는 여러현상에 대한 파악이 매우 어려운 점에서 기인한다고 할 수 있다.

#### 4.1 동적 모델링

지금까지 연구되어진 지능구조물에 대한 동적 모델링 방법은 크게

세가지로 나눌 수 있는데, 첫번째로, 변분법 이론 방법으로서 ERF를 함유한 지능구조물 자체를 고체영역과 유체영역으로된 점탄성 연속체 개념을 도입하여 전체 구조물에 대한 ERF의 질량비 및 체적비에 따른 점탄성 구성계수(constitutive coefficient)의 기여도를 부여한다. 그리고 지능구조물 변형

에 따른 저장된 에너지와 손실된 에너지를 특징으로 하는 범함수(functional)를 설정한 후, 변분법을 적용하는 가장 일반적인 동적 모델링 방법이다.

두번째는, 현상학적 방법으로 전장부하에 따른 지능구조물 시스템 동정(identification)을 실험적으로 수행하여 얻은 모달 매개변수를 이

용하여 동적 모델링 방법이다. 전장부하의 함수로 얻어지는 지능구조물의 강성과 감쇠 특성을 이용하여 다음과 같은 동적 모델링 식을 설정한다.

$$[M]\{\dot{U}\} + ([C] + [\Delta C(\tilde{V})])\{\dot{U}\} + ([K] + [\Delta K(\tilde{V})])\{U\} = \{F(t)\} \quad (3)$$

여기서,  $[M], [C], [K]$ 는 각각 전장 무부하시의 질량, 감쇠, 강성행렬을 나타낸다. 한편,  $[\Delta C(\tilde{V})], [\Delta K(\tilde{V})]$ 는 각각 전장부하에 의해 변화된 감쇠와 강성 행렬을 의미한다.  $\{U\}, \{F(t)\}$ 는 각각 구조물의 변형과 외력을 나타내는 벡터이다.

세번째로, ERF를 특징으로 하는 지능구조물이 기존 샌드위치 구조물에서 고무와 같은 점탄성 재료를 ERF로 대체한 사실을 바탕으로, 샌드위치 구조물 이론과 ERF 자체의 복소 전단모듈러스  $[G^*(\tilde{\omega}, \tilde{V})]$ 값을 연계한 동적 모델링 방법이다. 결국, 이 동적 모델링 방법으로부터 전장부하에 따른 시스템의 주파수 응답이 도출된다.

#### 4.2 진동제어

앞절에서 언급된 동적 모델링으로부터 크게 과도진동 상태와 강제진동 상태에 대한 진동제어 방법이 도출되는데, 외력이 없는 과도진동 상태에서 시스템의 요구응답(극점)을 얻기 위한 현상학적 진동제어 방법으로서 절차는 다음과 같다.

• 현상학적 모델링을 도입한 후, 모달좌표와 모드형상을 이용하여 비연계된 미분방정식을 얻는다.

$$\ddot{\eta}_i + 2\zeta_i \tilde{\omega}_i \dot{\eta}_i + \tilde{\omega}_i^2 \eta_i = -2\zeta_i (\tilde{V}) \tilde{\omega}_i (\tilde{V}) \dot{\eta}_i - \tilde{\omega}_i^2 (\tilde{V}) \eta_i \quad (4)$$

여기서,  $\tilde{\omega}_i, \zeta_i$ 는 각각  $i$ 번째 모드의 고유주파수와 감쇠비이며,  $\tilde{\omega}_i(\tilde{V}), \zeta_i(\tilde{V})$ 는 각각 전장부하에 의해 변화된 고유주파수와 감쇠비를 나타낸다.

• 전장부하 함수로 모달 변수를 실험적으로 도출한 후, ERF 액추에이터 식을 도출한다.

$$\zeta_i(\tilde{V}) \tilde{\omega}_i(\tilde{V}) / \zeta_i \tilde{\omega}_i = \alpha_{1i} \tilde{V}, \quad \tilde{\omega}_i^2(\tilde{V}) / \tilde{\omega}_i^2 = \alpha_{2i} \tilde{V} \quad (5)$$

여기서,  $\alpha_{1i}, \alpha_{2i}$  모달변수와 전장부하의 관계를 나타내는 실험상수이다.

• 비례-미분(PD)제어기 형태의 가제어력(pseudo-force)을 특징으로 하는 상태방정식으로 변환한다.

• 요구응답을 나타내는 극점을 설정한다.

• 가제어력의 게인에 의해 요구응답을 조율한다.

예를 들어, 지능 구조물의 첫번째 모드에 대한 과도응답을 조율하기 위한 상태방정식을 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_1^2 & -2\zeta_1 \omega_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (6)$$

여기서,  $[x_1 \ x_2]^T = [\eta_1 \ \dot{\eta}_1]^T, u = -\beta K x_1 - K x_2, K = 2\alpha_{11} \zeta_1 \tilde{\omega}_1 \tilde{V}, \beta = \alpha_{21} \tilde{\omega}_1 / 2\alpha_{11} \zeta_1$ 이며, 제어기,  $u$ , 기존의 비례-미분 제어기 형태로서 동탄성 특성을 변화시키는 가제어력을 나타낸다. 먼저, 요구응답을 나타내는 극점  $[-(\zeta \omega)_{1d} \pm j\omega_{1d}]$ 이 설정되면 제어기에서 전장부하의 함수로 명백히 표현되는 게인  $K$ 값을 조율하여 요구응답 극점을 얻는다. 한편,  $K$ 가 최대 전장부하에 의해 한정되기 때문에 요구 과도응답의 범위는 최대전장과 모달변수에 의해 좌우된다.

한편, 외부에서 주파수가 변하는 외란이 지속적으로 작용하는 강제진동시 효과적인 능동 진동 제어 방법으로써 절차는 다음과 같다.

• 전장부하의 함수로 제어하고자 하는 위치에 대한 주파수응답을 실험 또는 복소 전단모듈러스와 연계

된 샌드위치 구조물 모델링으로부터 얻는다.

• 도출된 주파수응답 중에서 각 주파수 대역( $\tilde{\omega}$ )에서 가장 낮은 곡선을 요구 응답(desired response)으로 설정한다.

• 요구응답의 주파수 대역에 해당하는 전장부하를 요구 전장부하( $\tilde{V}_d$ )로 정한다.

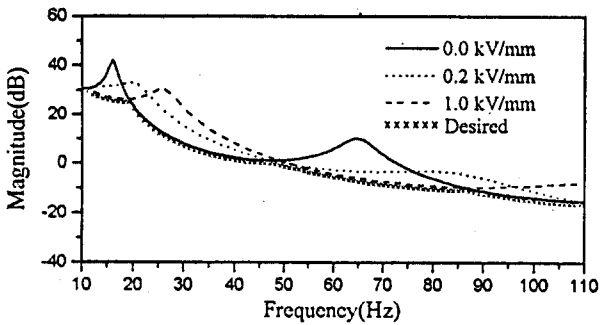
• 제시된 알고리즘을 마이크로 프로세서에 입력한다.

• 외란 정보인 센서 신호를 A/D 변환기를 통해 마이크로 프로세서로 보내 요구 전장부하를 결정한다.

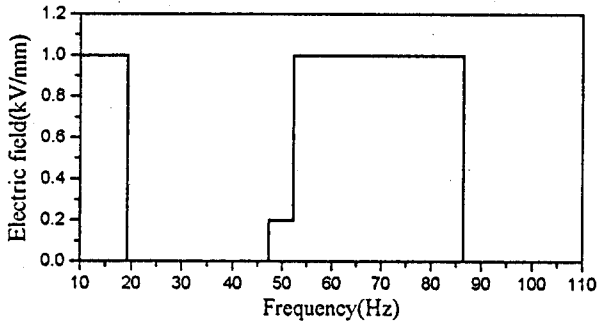
• 결정된 요구 전장부하가 D/A 변환기로 통해 나온 후, 고전압 증폭기에서 증폭되어 지능구조물에 입력된다.

위 제어방법론의 적용 예로서 항공기 날개와 같은 구조 및 경계조건을 가진 외팔보 형태의 지능구조물을 제작하여 구조물 끝점에 대한 능동 진동제어를 수행한 결과를 제시한다. 전장부하 함수인 복소 전단모듈러스와 샌드위치 구조물 이론을 연계한 모델링으로부터 그림 6(a)와 같이 전장부하의 함수로 도출된 주파수응답 중에서 끝점 변위가 최소가 되도록 하는 요구응답을 먼저 설정한다. 그리고 요구응답의 주파수 영역에 해당하는 전장부하를 요구전장으로 선택하여 그림 6(b)와 같이 얻는다. 이를 논리적 제어 알고리즘 형태로 표현하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

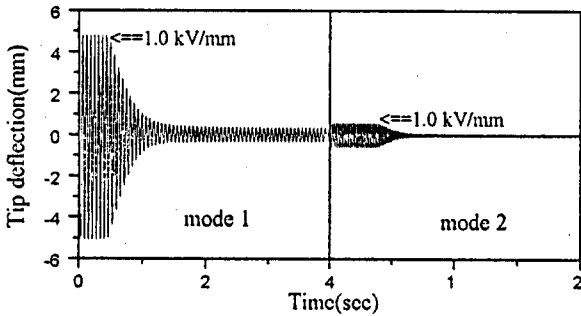
$$\begin{aligned} &IF \ 0.0\text{Hz} \leq \tilde{\omega} < 19.2\text{Hz}, \\ &THEN \ \tilde{V}_d = 1.0\text{kV/mm} \\ &IF \ 19.2\text{Hz} \leq \tilde{\omega} < 47.2\text{Hz}, \\ &THEN \ \tilde{V}_d = 0.0\text{kV/mm} \\ &IF \ 47.2\text{Hz} \leq \tilde{\omega} < 52.2\text{Hz}, \\ &THEN \ \tilde{V}_d = 0.2\text{kV/mm} \\ &IF \ 52.2\text{Hz} \leq \tilde{\omega} < 86.4\text{Hz}, \\ &THEN \ \tilde{V}_d = 1.0\text{kV/mm} \\ &IF \ 86.4\text{Hz} \leq \tilde{\omega} < 110\text{Hz}, \\ &THEN \ \tilde{V}_d = 0.0\text{kV/mm} \quad (7) \end{aligned}$$



(a) 주파수응답



(b) 요구전기장



(c) 제어응답

그림 6 강제진동제어를 위한 알고리즘 및 응답특성

따라서, 제시된 제어 알고리즘을 이용하여 전 주파수 영역의 외란에 대해 효과적인 능동 진동제어가 이루어진다. 그림 6(c)는 식 (7)의 제어알고리즘을 마이크로 프로세서에 입력한 후, 외부에서 주파수가 변하는 가진이 계속되는 상태에서 시스템의 출력을 센서로 피드백하는 실험적 구현을 통해 얻은 능동 진동제어 결과이다. 첫번째 모드(16.0Hz)에서는 4.78mm에서 0.38mm로, 두번째 모드(64.0Hz)에서는 0.75mm에서 0.10mm로 끝점의 변위가 감소하였다. 특히,

전국 한 부위에 전장부하를 인가하여 동시에 여러 진동모드에 대한

진폭제어를 수행할 수 있는 것이 기존의 모드별로 제어하는 액추에이터에 비해 큰 장점이다. 따라서, 고주파 성분이나 무시된 모드성분에 의해 연속체 진동제어 문제에서 흔히 발생하는 스펙오버(spillover) 현상을 피할 수 있다.

### 5. 잠재적 응용성

ERF 액추에이터의 독특한 특징으로 인해 그 응용분야는 간단한 밸브에서 자동차 부품, 정밀계측 시스템, 건축 및 토목 구조물, 항공기 날개, 우주구조물에 이르기까지 매우 광범위하고 다양하다. 지금까지, 가장 활발히 연구 개발되고 있는 분야는 자동차 산업 관련 분야인데 그 예로서 ER엔진마운트, ER속압소오버, ER밸브, ER브레이크 및 클러치 등이 있다. 그림 7은 현재 인하대학교 기계공학과 스마트 구조물 및 시스템 연구실에서 개발중인 ER엔진마운트로서 기존의 고무와 유체봉입을 특징으로 하는 기존 엔진마운트 보다 구조가 훨씬 간단하고, 전극에 전장부하를 인가함으로써 상부 챔버와 하부 챔버를 통과하는 ERF의 흐름을 조절할 수 있어 전체 엔진마운트의 고유진동수 및 기계적 성질이 제어되기 때문에 엔진소음과 진동을 줄일 수 있다. 또한, 속압소오버와 밸브에서는 ERF에 전장

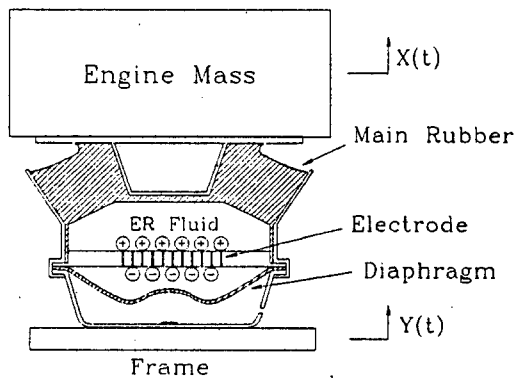


그림 7 ERF를 이용한 엔진마운트

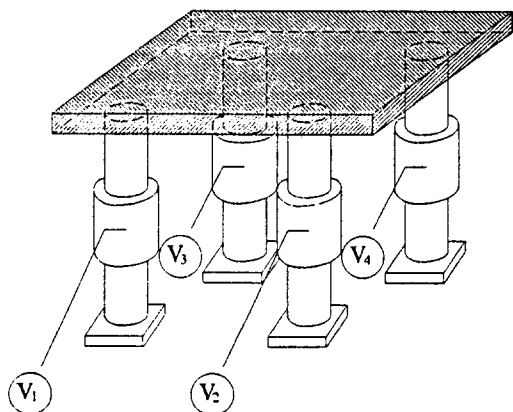


그림 8 ER댐퍼를 이용한 정밀테이블

부하를 인가하는 전극이 기존의 오리피스 및 가동기계 장치를 대신하여 시스템을 보다 단순화 시킬 수 있어서 제작의 편리함과 아울러 빠른 응답속도를 특징으로 댐핑력 및 압력 변화를 능동 피드백 제어 할 수 있다. 또한, 클러치 및 브레이크 시스템 분야에서도 ERF의 빠른 응답성을 특징으로 하여 전단력 크기를 전장부하의 함수로 능동 조절할 수 있기 때문에 구동축과 종동축의 동력을 전달, 차단, 제어하는데 매우 효과적으로 사용된다.

정밀계측 장치 분야에서도 ERF를 매우 유용하게 사용할 수 있는데, 그림 8과 같은 ER 제진대기한 예이다. 각 다리에 설치된 ER 댐퍼에 독립적으로 테이블 위의 변위를 피드백 받아 전장부하를 인가하는 능동 피드백 장치를 설치하여 지면에서 오는 외란이 테이블 위로 전달되는 것을 감소 및 차단 시킬 수 있어 보다 정밀한 측정 및 품질의 생산품을 얻을 수 있다. 이와 유사하게 선박의 경우 자이로스코프 메카니즘을 이용하여, 피칭(pitching), 요잉(yawing), 롤링(rolling)을 ER댐퍼의 감쇠력으로 능동 피드백 제어하여 심한 파도와 같은 외란이 있더라도 효율적으로 차단하여 배안의 화물을 안정되게 하고 또한 승객의 쾌적한 항해를

할 수 있다.

현수교는 다리위에 부하되는 여러 정적 하중자체 보다도 돌풍(gust)이나 지나가는 차량과 같은 동적 하중에 의한 다리의 공진에 의해 심한 변형 또는 심지어는 1940년 미국의 Tacoma Narrows Bridge처럼 붕괴될 수 있다. ERF를 현수교의 스패ん(span) 및 거더(girder)등 현수교 전체의 동탄성

특성을 전장부하에 의해 효과적으로 변화시킬 수 있는 부위에 함유되어 돌풍 및 차량 하중·위치·속도등 다양하게 변하는 외란을 센서로 능동 피드백 받아 전장 부하의 적절한 인가를 통해 공진 현상을 피하여 심한 변형 및 파괴를 방지할 수 있는 그림 9와 같은 지능 현수교를 건설할 수 있다. 이와 유사하게 빌딩의 창문에 ERF를 함유하여 강풍이나 지진시에 전장부하를 효과적으로 인가하여 공진현상에 의한 흔들림으로부터 보호할 수 있다. 한편, 기존의 점탄성 재료를 이용한 방음벽은 압축파의 방향을 감소시켜 제한된 주파수 영역에서 전달 소음에너지 흡수하는데 반해서 ERF를 사용한 방음벽은 전장부하에 의해 효과적으로 전달 소음흡수율을 조절할 수 있기 때문에 매우 광범위한 주파수 영역에서 효과적인 방음벽 역할을 수행할 수 있다.

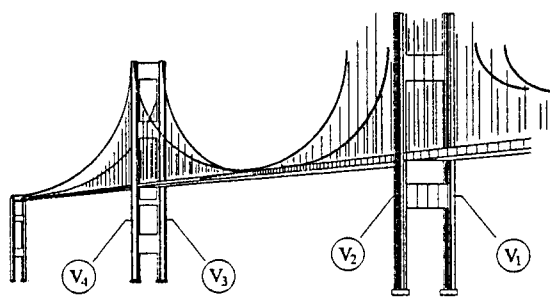


그림 9 ER댐퍼를 이용한 지능현수교

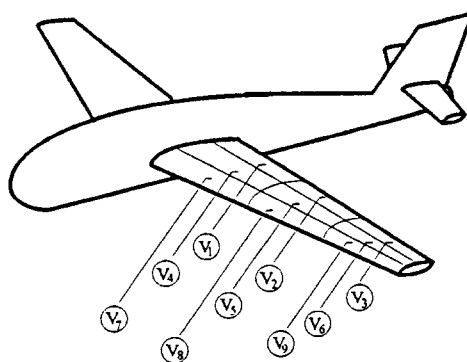


그림 10 ERF를 이용한 항공기의 지능날개



항공기 날개는 예기치 못하는 기상조건 변화 및 이착륙등 복잡한 기능 수행함에 있어 심한 채터링을 자주 유발하게 되어 항공기 자체의 진동을 발생시킨다. 그림 10에서 보는 바와 같이 항공기 날개속에 각기 다른 특성을 갖고 있는 ERF를 삽입하여 각 날개 요소에서 요구되는 성능을 만족시키기 위해 각 요소에 설치된 센서의 독립적인 능동 피드백된 시스템 출력을 바탕으로 전장부하를 인가하여 날개 각 요소가 지능적으로 공진 현상을 회피하는 지능 항공기 날개를 제작할 수 있다. 따라서, 항공기 날개의 플러터 현상 제어와 이에 따른 항공기 조정성 증가, 그리고 승객의 탑승 안락감 등을 피할 수 있다.

## 6. 맺 음 말

본 글에서는 지능구조물의 개념 설명과 더불어 ERF의 특성, ERF를 함유한 지능구조물 시스템의 구성, 동적 모델링과 진동제어 그리고 그 응용성에 관한 연구 현황과 방향에 대해 살펴보았다. 설명한 바와 같이 지능구조물은 새로운 차원의 신생하는 첨단 분야로서, 소음 및 진동에 관련된 무한한 잠재력과 다양한 응용성으로 미루어 볼 때 아주 매력적인 연구 분야이다. 그러나, 여러 응용 시스템의 상품화 단계로의 도약에 있어서 각 시스템 구성 요소 분야별 해결해야 할 연구 사항들이 있다. 먼저, 액추에이팅을 수행하는 ERF 자체의 내구성 문제로서 고온에서 ERF의 효과 하락과 장시간 사용 시 ERF에 의한 마멸, 고체 입자의 침전에 의한 초기 상태 불안정 등이 있다. 아울러 기존의 장치의 성능을 능가하기 위해 보다 큰 효과를 나타내는 새로운 차원의 ERF 개발이 요구된다. 그리고, 센서기술 분야에

서는 호스트 재료에 보다 쉽게 결합이 되고 여러가지 형태의 요구조건을 만족시킬 수 있으며 외부 환경조건에 강건한 다양한 센서 개발이 요구된다. 또한, 보다 일반적인 동적 모델링을 통해 적용 시스템에 적합하고 강건한 제어기에 대한 연구가 진행되어야 한다. 마지막으로, 능동제어를 실제로 구현하기 위한 호스트 재료 각 요소마다 센서의 설치, 폐회로 피드백 시스템 장착, 상호간의 인터페이스 등의 기술 발전이 요구되며, 아울러 보다 효율적인 시스템의 성능 특성을 실현할 수 있는 호스트 재료와 기계 메카니즘이 필요로 된다. 이상의 설명에서 알 수 있듯이 지능구조물에 대한 연구는 어느 한 분야에서만 아니라 기계, 전기전자, 토목, 물리, 재료과학 등 통합형식에 의한 접근 방향으로 추진되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- (1) Gandhi, M.V. and Thompson, B.S., 1992, "Smart Materials and Structures", London: Chapman & Hall.
- (2) Rogers, C.A., Baker, K.D. and Jaeger, C.A., 1988, "Introduction to Smart Materials and Structures," Proc. of U.S.A. ARO Workshop, pp. 17~28.
- (3) Crawley, E.F. and De Luis, J., 1987, "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures," AIAA Journal, Vol. 25, No. 10, pp. 1373~1385.
- (4) Claus, R.O., Mckeeman, J.C., May, R.G. and Bennet, K.D., 1988, "Optical Fiber Sensors and Signal Processing for Smart Materials and Structures Applications," Proc. of U.S.A. ARO Workshop, pp. 29~38.
- (5) Rogers, C.A., 1990, "Active Vibration and Structural Acoustic Control of Shape Memory Alloy Hybrid Composites: Experimental Results," Journal of Acoustical Society of America, Vol. 88, No. 6, pp. 2803~2811.
- (6) Choi, S.B., Park, Y.K. and Kim, J.D., 1993, "Vibration Characteristics of Hollow Cantilevered Beams Containing an Electro-Rheological Fluid," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 35, No. 9, pp. 757~768.
- (7) Choi, S.B., Park, Y.K. and Suh, M.S., 1994, "Elastodynamic Characteristics of Hollow Cantilever Beams Containing an Electro-Rheological Fluid: Experimental Results," AIAA Journal, Vol. 32, No 2, pp. 438~440.
- (8) Choi, S.B. and Park, Y.K., 1994, "Active Vibration Control of a Cantilevered BEam Containing an Electro-Rheological Fluid," J. of Sound and Vibration, Vol. 172, No. 3, pp. 428~432.
- (9) 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, No. 12, pp. 1232~1255.
- (10) Winslow, W.M., 1949, "Induced Fibration Suspensions," Journal of Physics Technology, Vol. 20, No. 12, pp. 1137~1140.