

지능 구조물과 능동 진동 제어

Smart Structures and Active Vibration Control

곽문규
Moon Kyu Kwak

동국대학교 기계공학과

1. 서 론

진동이 심각한 문제를 일으키는 구조물에 있어 수동적인 진동제어 방법으로 이러한 문제를 치유할 수 없는 경우가 발생한다. 이 경우 시스템의 성능 향상을 위하여 능동적으로 진동을 제어할 수 있는 방법을 모색하게 되는데 이와 관련된 연구가 활발히 진행되어 오고 있다. 특히 감지기(Sensor)와 작동기(Actuator)를 구조물의 표면에 부착하거나 구조물의 한 부분으로 삽입하고 제어시스템과 연결한 구조물을 일반적으로 지능구조물(Intelligent Structure 또는 Smart Structure) 이라고 부른다. 본 논문에서는 진동 제어를 위한 작동기로 활용되고 있는 압전세라믹을 대상으로 이를 이용한 지능 구조물의 능동 진동 제어에 관한 연구 동향을 살펴보고, 이를 이용한 능동진동제어에 대해서 살펴보고자 한다. 최근 동향을 조사하기 위하여 곽문규[1], 이인,한재홍[2], Ahmadian and DeGuilio[3] 논문을 참조하였다.

감지기나 작동기 또는 이들 모두를 장착한 구조물에 대해서는 Adaptive Structures, Sensory Structures, Controlled Structures, Active Structures, Intelligent Structures, Smart Structures 등이 사용되고 있다. Wada, Fanson and Crawley[4]는 이들 용어를 정리하여 다음과 같이 정의하였다. 형상이 변형될 수 있는 구조물(Adaptive Structures)은 작동기만을 소지하고 있는 구조물을 지칭하며 사용자가 원하는 바대로 그 형상을 바꿀 수 있는 구조물이다. 감지 구조물(Sensory Structures)은 감지기를 통해 구조물의 구조상 결함이나 손상 여부를 혼합한 형태가 제어 구조물(Controlled Structures)이다. 제어 구조물은 감지기와 작동기를 모두 구비하고 있는 구조물인데 시스템의 상태나 변위를 감지하고 피드백제어회로를 통하여 제어를 동시에 수행할 수 있다. 제어 구조물은 일반적으로 구조물과 감지기, 작동기가 확연하게 구조물과 구별되는 경우에 사용되는 용어이고 이에 반하여 감지기와 작동기가 구조물의 일부로 포함되는 경우에는 능동 구조물(Active Structures)로 불리게 된다. 지능 구조물(Intelligent Structures, Smart Structures)은 신경망(Neural Network)이나 퍼지로지(Fuzzy Logic)과 같이 첨단 제어기를 내장하고 있어 구조물 자체가 능동적으로 상황 변화에 대처할 수 있는 보다 지능적인 구조물을 의미한다. 최근에는 지능구조물이라는 용어가 보편적으로 사용되고 있다. 일부에서는 다기능구조물(Multi-functional Structure)라는 신조어를 사용하기도 한다.

최근에 기계시스템과 전자시스템, 그리고 전산제어가 결합되어 메카트로닉스라는 새로운 학문 분야를 만들었다면, 구조물과 지능재료, 그리고 전산제어가 합쳐져 지능구조물을 만들어 냈다고 말할 수 있다. 사실상, 이들 두 분야는 유사한 면이 많아 이들이 다시 결합하여 보다 초지능적인 구조물을 생성해 낼 것으로 보인다. 지능구조물이 현재 우리 생활에 들어와 사용되고 있는 예를 들어 보면, 지능적인 의료시스템, 비행기의 날개, 미사일의 핀, 헬리콥터의 로터블레이드, 잠수함의 외판, 전자동화된 집, 진동이 제어되는 테니스 라켓, 스키, 스노우 보드, 초음파모터, 초소형 비행체, 초소형 로봇 등을 들 수 있다. 그러나 아직까지 강력한 지능재료가 제공되고 있지 않아 응용 분야가 확산되고 있지 못하는 상태이다.

지능구조물이 효과적으로 외부 변화에 대응하기 위해서는 자신에게 닥친 상황을 좀더 정밀하게 예측할 수 있는 감지기와 제어력을 충분히 발휘하여 이런 상황을 타개할 수 있는 작동기가 있어야 한다. 현재 우리가 사용할 수 있는 감지기와 작동기, 재료의 종류를 살펴보면, 전통적으로 구조물의 감지 장치로 사용되어 왔던 스트레인게이지 (Strain Gage) 나 가속도계(Accelerometer), 분포감지기의 역할을 담

당할 수 있는 압전폴리머(Polymeric Piezoelectric Polyvinylidene Fluoride, PVDF), 부저나 스피커로 사용되었던 압전세라믹(Piezoelectric Ceramics), 형상 기억 합금 (Shape Memory Alloy, Nitinol), 형상 기억폴리머(Shape Memory Polymer), 전자기 유체 (Electromagnetic Fluid), 전자장을 이용한 작동기 (Magnetostrictive Material), 압전세라믹 작동기의 단점을 보완한 Rainbow, Thunder, LIPCA, MFC(Macro Fiber Composite) 작동기 등이 있으며, 기계적인 장치로는 Proof-Mass Actuator, Reaction Wheel 등이 있다. 각 작동기의 성능을 비교해 보면 다음 표와 같다.

Table 1. Comparison of Actuators

	Stress (Mpa)	Strain	효율	Bandwidth (Hz)	Work (J/cm ²)	Power (W/cm ³)
Electro-magnetic	0.02	50%	90%	20	0.005	0.1
Hydraulic	20	50%	80%	4	5	20
Pneumatic	0.7	50%	90%	10	0.175	3.5
Muscle	0.35	20%	30%	10	0.035	0.35
Shape Memory	200	10%	3%	3	10	30
Piezoelectric	35	0.2%	50%	5000	0.035	175
Electro-Restrictive	50	0.2%	50%	5000	0.05	250
Magneto-Restrictive	35	0.2%	80%	2000	0.035	70

이 표에서 알 수 있듯이 지능재료로 알려진 재료들이 아직은 효율이나 출력에서 기존의 작동기 보다 뒤떨어진다. 새로운 지능재료를 찾으며 하는 노력이 계속되고 있어, 앞으로 좀더 강력한 작동기가 출현될 것으로 기대하고 있다.

2. 지능구조물

앞에서 열거한 지능재료들의 특징은 전기장 또는 자기장을 가했을 경우에 재료의 구조가 변형되거나 물성치가 바뀐다는 것이다. 특히, 압전재료는 압전(Piezoelectricity)효과에 의해 기계적인 에너지를 전기적인 에너지로 변환하거나 반대로 전기적인 에너지를 기계적인 에너지로 변환할 수 있다. 압전효과는 100 여년전 Jacques Curie 와 Pierre Curie에 의해 수정의 결정체에 관한 연구로부터 발견되었다. 이후 압전결정체는 트랜스듀서, 기록 또는 재생용 픽업요소, 마이크에 사용되게 되었다. 퀴리가 압전 현상을 1880년에 발견하였지만, 1940년대에 와서야 임피던스가 높은 증폭기가 개발되어 과학자와 공학자들이 신호를 증폭할 수 있게 되었고 이를 이용해 비로소 압전 재료들을 의료, 군사, 가전제품 등 여러 분야에서 이용할 수 있게 되었다. 특히 2차 세계대전 전후로 세라믹 계통의 압전소재들이 개발되어 이를 응용한 제품이 개발되었는데 대표적인 것으로는 가속도센서, 적외선 감지기, 초음파 트랜스듀서, 스피커, 마이크로폰 및 수중 탐지기 센서 등이 있다. 최근에는 압전재료들이 우주 구조물이나 의공학장비와 같은 다양한 분야에서 사용되고 있다.

압전 현상은 자연상태의 수정에서 발생하나 납이나 지르코늄(zirconium), 타이타늄(titanium) 같은 재료로 구성된 압전세라믹(Piezoceramic, 간략히 PZT로 표현)과 같은 재료에서도 나타난다. 압전세라믹과 같은 혼합 금속에 압전 현상이 발생하기 위해서는 먼저 퀴리(Curie) 온도까지 재료를 가열한 다음 원하는 방향으로 충분한 전압장을 가하여 이온들이 극성(polling) 축 방향으로 정렬하게 만든다. 이 과정을 거치면 냉각 후에 압전세라믹의 이온들이 극성을 기억하게 되어 이에 따라 행동하게 된다.

압전재료 중의 하나인 압전폴리머는 압전세라믹에 비하여 작동기로서의 힘발생력이 떨어지고 온도에 민감하다는 단점으로 인하여 그 사용이 제한적이다. 그러나 분포감지거나 작동기 형태로 사용할 수 있어 구조물이 갖고 있는 개개의 진동 모드를 개별적으로 감지할 수 있고 또한 개개의 진동 모드를 선별하여 제어할 수 있는 장점이 있다. 반면에 압전세라믹은 압전폴리머에 비해 동일 전압에 대해 큰 힘이 발생하며, 온도에 덜 민감하다는 장점이 있어 실제문제에 응용되고 있다. 최근에는 압전 효과를 극대화하기 위한 노력의 일환으로 Rainbow, Thunder, LIPCA, MFC 작동기 등이 개발되어 사용되고 있다.

압전체에 가해지는 전기장과 응력, 변형율과 전하량에 관한 구성방정식은 일반적으로 식(1)과 같이 표현하고 있다.

$$\epsilon_p = S_{pq}^E \sigma_q + d_{ip} E_i, D_i = d_{iq} \sigma_q + \epsilon_{iq}^0 E_k, i, k = 1, 2, 3, p, q = 1, 2, \dots, 6 \quad (1)$$

여기서, ϵ_p 은 변형율, σ_q 은 응력, E_i 는 전기장(electric field), D_i 는 전하 밀도 (charge density or electric displacement), S_{pq}^E 는 탄성 순응 계수(elastic compliance matrix), d_{ip} 는 압전 변형 상수 (piezoelectric strain constants), ϵ_{iq}^0 는 부전도 계수(dielectric permittivity matrix)이다. 구성방정식, 식(1)에서 기계-전기 연성을 나타내는 물성치가 d_{ip} 이다. 이 물성치를 좀더 자세히 살펴보기 위하여 1차원 문제를 예로 들어 보자. 3 방향 두께가 h_3 로 아주 얇으며 2축 방향으로의 변형이 억제되고 3축 방향으로만 전압, V_3 가 작용하는 경우에 1축 방향으로 발생하는 변형율은 식(2)와 같이 된다.

$$\epsilon_1 = d_{31} E_3 = \frac{d_{31} V_3}{h_3} \quad (2)$$

이 식은 압전세라믹 판을 보에 부착한 경우의 작동기 방정식으로 이해될 수 있다. 따라서 가해진 전압에 의해 압전체가 변형되고 이로 인해 구조물이 움직이게 된다. 이 식을 좀더 자세히 살펴보면, d_{31} 이 전기-기계 연성에 관한 물성치이며 아래 첨자는 3 방향에 전기장이 가해지고 변형이 1방향으로 이루어짐을 의미한다. 따라서 d_{31} 값이 큰 압전체일수록 작은 전압으로 큰 변형율을 얻게 된다. 실제의 압전체에 있어서 d_{33} , 즉 3방향으로 전기장을 가하고 3방향으로 변위가 일어나는 물성치 값이 d_{31} 보다 큰 값을 갖는다. 이를 이용한 것이 MFC 작동기인데 전극을 교차로 배열(Interdigitation)하여 압전효과를 증대하였다.

압전체가 구조물과 결합된 시스템에 대한 해석은 간단한 보의 해석으로부터 출발한다. Crawley and de Luis의 논문[5]은 압전작동기에 대한 초기 논문들 중의 하나인데 이 논문에서 그들은 압전재료와 탄성 구조물간의 연성을 묘사하는 두 개의 일차원 정적 모델을 제시하였다. 이후 많은 압전체와 다양한 구조물이 결합된 지능구조물의 모델링에 관한 논문이 발표되었다. 연속체인 구조물에 압전체를 결합시킬 경우 Rayleigh-Ritz방법이나 유한요소법을 사용해 이론적인 동적모델을 구할 수 있다. 유한자유도를 갖는 이산계 운동 방정식과 감지 방정식의 일반 형태는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = B_0 G_0 v_s \quad (3)$$

$$v_s = G_s C_s^{-1} B_s^T q$$

여기서 M, C 과 K 는 각각 질량, 감쇠, 강성 행렬을 가리킨다. q 는 일반변위를 나타내며 B_0 는 개개의 압전작동기가 일반변위에 미치는 영향을 나타내는 영향 행렬이고 G_0 는 각각의 압전작동기에 대한 증폭 앰프(Power Amp)의 이득에 해당한다. v_s 는 감지기 신호가 변환된 전압 출력을 가리키며 G_s 는 감지기 앰프의 이득 그리고 C_s 는 압전감지기의 감도를 나타낸다. 또한 B_s 는 감지기의 영향 행렬을 나타낸다. 식 (3)과 같이 Rayleigh-Ritz 방법이나 유한요소법을 사용하여 운동방정식을 유도되는 경우 그 자유도가 제어를 설계하기에는 높기 때문에 저차의 고유모드를 이용하여 운동방정식을 축소하는 것이 일반적인 접근방법이다. 이를 위해 고유치문제를 먼저 해석하고 고유치 문제의 해를 이용하여 다음과 같은 모달방정식을 유도하여 사용하는 것이 바람직하다.

$$\ddot{z} + 2Z\Omega\dot{z} + \Lambda z = \bar{B}_a v_a, \quad v_a = \bar{B}_z z \quad (4)$$

이 식을 유도하기 위해 좌표변환, $q = Uz$ 를 이용했고, 고유모드의 직교성질, $U^T M U = I, U^T K U = \Lambda$ 를 사용하였다. 여기서 I 는 단위 행렬, U 는 고유벡터, Λ 는 고유치가 대각선으로 배열된 행렬, Ω 는 고유진동수가 대각선으로 배열된 행렬, Z 는 감쇠계수가 대각선으로 배열된 행렬을 나타낸다. 이 과정에서 감쇠계수행렬이 대각선행렬이 된다는 가정이 도입되었다. 전체 고유 벡터 중 제어 대상 모드만을 고려한다면 식 (4)는 식 (3)에 비해 차수가 줄어들게 된다. 제어 이론에 있어 식(4)로 표현되는 2차의 연립 미분방정식보다는 1차의 연립미분방정식인 상태방정식(State Eq.)이 주로 사용된다. 따라서 식(4)를 상태방정식 형태로 전환할 필요가 있다. 새로운 상태벡터, $x = [z^T \dot{z}^T]^T$ 를 도입하면 다음과 같이 간단하게 상태방정식으로 전환할 수 있다[6].

$$\dot{x} = Ax + Bv_a, \quad v_a = Cx + Dv_a \quad (5)$$

여기서 계수 행렬들은 식(4)와 비교하면 쉽게 그 성분을 구할 수 있다. 식 (5)는 압전작동기와 감지기가 부착된 구조물에 대한 상태방정식이지만, 압전작동기와 감지기가 아닌 다른 형태의 작동기와 감지기의 경우에도 동일한 형태의 운동방정식이 유도된다. 대상 모드를 고려하여 차수를 줄인다하여도 실제로 제어기를 설계할 경우 감지기와 작동기의 숫자가 제한되어 있어 제어할 모드수보다 감지기, 작동기 수가 적을 수 있다. 이럴 경우 원하지 않는 영향이 나타나게 된다. 특히 저차의 모드를 제어하는 경우 고차의 진동 모드에 원하지 않은 영향이 미치게 된다. 이런 현상을 일반적으로 제어넘침(Control Spillover) 문제라고 부른다. 이와 마찬가지로 이유로 감지기에도 넘침 문제가 발생하게 된다. 구조물의 진동에 있어 일반적으로 고차모드에서는 구조물 자체에 내재하는 자연댐핑의 영향이 커져 실제로는 제어이득을 높이지 않는 한 심각해지지는 않는 것으로 알려져 있다.

3. 능동진동제어

앞에서 소개했듯이 압전효과란 압전소자에 압력이 가해졌을 경우 기계적 변형이 일어나 압전소자에 전하(charge)가 발생하는 것을 말한다. 이를 반대로 이용하면 전압을 걸었을 경우 압전소자의 형상이 변화되어 작동기로서 사용될 수 있다. 전자의 응용 예로는 마이크로폰과 진동센서등을 들 수 있고 후자의 응용 예로는 스피커, 부저 등 작동기로서의 예를 들 수 있다. 압전재료의 능동댐핑으로의 적용에 관한 종합적인 보고서로는 Bronowicki, Betros 와 Hagoood의 노트[7]가 있는데 이 보고서는 압전세라믹을 이용한 능동감쇠에 관하여 이론적인 배경과 간략화 방법, 실제적인 제어 기법 등을 포함하고 있어 압전 재료를 이용한 능동 진동 제어에 관한 연구를 시작하려는 사람들에게 훌륭한 참고서로서 활용될 수 있을 것이다.

전원을 이용해 좀더 능동적으로 제어력을 높이면 선트회로에 의한 감쇠에 비해 보다 효과적인 능동 감쇠를 얻을 수 있고 보다 지능적인 제어기를 적용할 수도 있다. 이 경우 압전감지기와 작동기를 사용한 피드백 제어 시스템이 Fig. 6과 같이 구성된다. Fig. 6를 살펴보면 구조물에 부착된 압전감지기로 부터 구조물의 변형을 감지하고 이를 제어로직을 통해 적절한 제어력을 계산하여 압전작동기에 제공하면 능동제어가 실현된다.

지능 구조물의 능동 제어에 있어 Fig. 6의 피드백 제어 시스템에 근거하여 다양한 제어기가 설계되어 활용되고 있지만 그 중 실용성과 효과면에서 인정을 받고 있는 제어기가 PPF 제어기이다. PPF 제어기는 아날로그 회로도 구성이 가능할 정도로 그 구조가 단순하며, 강인성이 보장되고 목표로 하는 진동 모드를 확실하게 제어할 수 있다는 이점이 있다.

PPF(Positive Position Feedback) 제어기는 Fanson and Caughey[8]가 처음 소개하였고 압전 재료를 붙인 외관보를 사용하여 실험적으로 PPF 제어기의 타당성을 증명하였다. 이후 PPF 제어기를 이용한 능동진동제어에 관한 많은 연구 결과가 발표되었다. PPF 제어기의 장점은 다음과 같다. 특정 주파수대역의 감쇠를 확실하게 증가시킬 수 있어 고유 진동 모드들이 밀집되어 있더라도 개개의 고유 모드들을 독립적으로 제어할 수 있다. 또한 설치가 간단하며 spillover 현상에 덜 민감하고 작동기의 동적

거동에 의해 불안정해지지 않는다. 그리고 일반 변위를 사용하기 때문에 변형률을 계측하는 경우에 합당하다고 말할 수 있다. PPF 제어기의 전달함수는 다음과 같이 표현된다.

$$H(s) = \frac{\omega_f^2}{s^2 + 2\zeta_f \omega_f s + \omega_f^2} \quad (8)$$

여기서 ζ_f 와 ω_f 는 PPF 필터의 댐핑계수와 고유 진동수를 나타낸다. 이식을 그림으로 나타내보면 다음 그림과 같다.

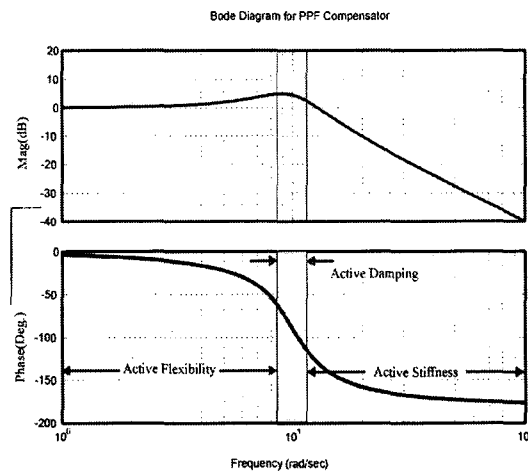


Fig. 1. Bode Diagram for PPF Controller

이 그림에서 알 수 있듯이 PPF 제어기는 필터이론에서 사용하는 기본적인 저주파 통과 필터(Low-Pass Filter)와 동일한 형태이다. Fig. 1의 PPF 제어기는 10 rad/s의 진동수를 제어하도록 조정되어 있는데, 이 진동수에서 90도의 위상차를 갖는 것을 알 수 있다. 이 성질을 이용해 능동감쇠(Active Damping), 즉 능동진동제어를 구현한다. PPF 회로는 Op Amp를 사용하여 간단하게 회로를 구성할 수 있다[9].

위에서 설명한 PPF 제어기외에도 압전웨이퍼 한 개를 감지기와 작동기로 동시에 사용하는 자아감지 가능 작동기 (Self-Sensing Actuator)의 설계에 관한 연구, SRF(Strain Rate Feedback) 제어기, Impedance Matching 제어기법, LQG/LQR, 강인제어기, μ Synthesis, H_∞ 제어 등에 관한 연구가 수행되었다.

앞에서 설명한 것처럼 구조물에 압전체를 부착하면 진동에 의해 발생하는 힘이 압전세라믹을 변형하고 이로 인해 전압차가 발생한다. 이 전압, 즉 전기적인 에너지는 저항회로를 이용해 발산시킬 수 있다. 이와 같이 간단한 회로를 이용하여 감쇠효과를 얻는 기술을 이용한 상업적인 제품이 K2 스키와 Copperhead 배트이다. 스키 디자이너들은 저항과 콘덴서(RC) 션트(shunt) 회로를 사용하여 스키에 삽입된 압전체가 흡수한 에너지를 발산시켰다. Active Control eXpers 사에서는 기계적인 진동 에너지를 전기적 에너지로 변화시키고자 션트한 압전체료를 Copperhead 배트에 삽입하였다. 이렇게 함으로써 충격을 완화시켜 배트의 스위트 스폿(sweet spot)을 좀더 넓게 만들었다. 션트회로의 장점은 전원이 별도로 필요로 하지 않는다는 것이다. 그 외 특이할 만한 논문으로는 수동댐핑과 능동댐핑을 결합된 시스템, 소위 ACLD(Active Constrained Layer Damping)이라고 부르는 시스템에 대한 연구가 있다.

참고로 LQR, LQG 제어기를 실제 적용하는 경우에는 DSP 보드와 같이 신호처리를 빨리 할 수 있는 제어보드를 사용해야 한다. 그렇지만 이 경우 A/D, D/A Converter에서 발생하는 Time-Delay, Anti-Aliasing Filter에서 발생하는 위상 각의 변화 등 아날로그 제어에서 볼 수 없었던 현상들이 나타나게 된다. 그리고 A/D, D/A의 Sampling Speed는 제한이 있어 많은 수의 고차진동 모드를 제어할 수 없게 된다. 최근 DSP Chip의 개발로 피이드백 제어 주기가 짧아지고 있으므로 좀더 많은 수의 진

동 모드를 제어할 수 있을 것으로 예상된다. 참고로 Adaptive Control, 퍼지로지적 제어, 신경망제어등은 Parallel Processing 이 요구되는 회로라 데이터 처리를 더 빨리 할 수 있는 마이크로 프로세서를 이용해야 한다.

4. 결론

개략적이거나 지능구조물과 능동 진동 제어에 관한 연구 동향과 연구 결과를 살펴보았다. 감지기와 작동기가 결합된 지능구조물의 개념과 응용 사례를 설명하고, 지능구조물의 동적 모델링에 관한 문제와 이 모델을 이용해 능동진동제어기를 설계하는 방법을 토론했다. 현재 능동 진동 제어에 가장 활발히 사용되고 있는 압전세라믹 작동기와 감지기의 장단점을 설명하였는데, 압전세라믹 작동기와 감지기를 이용한 진동제어는 박판으로 이루어진 국부구조물의 진동제어에 적합하다. 겹쳐놓은 형태의 압전세라믹은 트러스 구조물의 능동멤버로도 활용할 수 있는데, 이렇게 겹쳐놓은 형태의 압전세라믹 구조는 진동 고립(Vibration Isolation)을 원하는 장비의 지지대로 응용할 수 있을 것으로 예상된다. 현재 MFC 작동기와 같이 기존의 압전세라믹 작동기의 성능을 개선하고자 많은 연구가 이루어지고 있다.

최근까지의 능동 진동 제어는 주로 외팔보, 또는 평판과 같은 단순한 기하학적 형상을 가진 구조물에 국한되어 연구가 진행되어 왔으며 아직 실제 구조물에 적용하여 그 효과를 검증한 예는 드물다. 또한 제어 기법도 그 동안 전기 제어 분야에서 개발되어 온 기법들을 그대로 원용해 사용하였는데, 구조물의 자유도가 무한대인 점을 고려할 때 앞으로 구조물에 좀더 합당한 제어 기법의 개발이 이루어질 것으로 예상된다. 본 논문에서 소개한 PPF 제어 기법과 선트회로를 이용한 능동감쇠는 그 동안 개발되어 온 제어기 중에서 비교적 실용성이 높은 제어 방법이라고 생각되어 소개하였다.

지능재료를 이용해 능동 진동 제어를 수행함에 있어 또 다른 문제는 적절한 앰프와 디지털 마이크로프로세서의 설계와 연결 방법이다. 지능구조물을 연구하는 기계공학 전공자들이 가장 취약한 부분인데, 앞으로 기계공학과 전자 공학과 컴퓨터 프로그래밍의 연계 전공에 대해 좀더 많은 관심을 기울여야 할 것으로 보인다.

참고문헌

- (1) 광문규, 1995, "압전재료를 이용한 지능구조물의 능동진동제어", 한국소음진동학회지, 제5권 제3호, pp. 292-302.
- (2) 이인, 한재홍, 1997, "압전재료를 이용한 스마트 구조물의 진동제어에 관한 연구동향," 한국항공우주학회지, 제25권, 제3호 pp. 168-176.
- (3) Ahmadian, M. and DeGuilio, A.P., 2001, "Recent Advances in the Use of Piezoceramics for Vibration Suppression," The Shock and Vibration Digest, Vol. 33, No. 1, pp. 15-22.
- (4) Wada, B.K., Fanson, J.L. and Crawley, E.F., 1989. "Adaptive Structures," Proceedings of the 30th Structural Dynamics Conference, Mobile, AL, pp. 1-8.
- (6) Meirovitch, L., 1989, Dynamics and Control of Structures, John Wiley & Sons.
- (5) 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.
- (7) Bronowicki, A.J., Betros, R.S. and Hagood, N.W., 1993, "Active Damping Using Piezoceramics," SPIE's 1993 North American Conference on Smart Structures, Short Course Notes.
- (8) Fanson, J.L. and Caughey, T.K., 1990, "Positive Position Feedback Control for Large Space Structures," AIAA Journal, Vol. 28, No. 4, pp. 717-724.
- (9) 허석, 김기영, 광문규, 2004, "아날로그 회로와 마이크로 프로세서를 이용한 PPF 제어기의 구현", 한국소음진동공학회 논문집, 제 14권 제 6호, pp. 455-462.