

◆특집◆ 스마트재료의 응용

압전세라믹을 이용한 지능 구조물의 능동 진동 제어

곽문규*

Active Vibration Control of Smart Structure Using Piezoceramics

Moon Kyu Kwak*

Key Words : Active Vibration Control(능동진동제어), Piezoceramic Sensor(압전감지기), Piezoceramic Actuator(압전작동기), Positive Position Feedback Control(양변위배환제어), Shunted Damping(섀트 감쇠)

1. 서론

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 살펴보고자 한다. 최근 동향을 조사하기 위하여 곽문규 [106], 이인,한재홍[126], Ahmadian and DeGiulio[2] 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[99]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 청취할 수 있는 구조물이다. 이들 두 종류를 혼합한 형태가 제어 구조물(Controlled Structures) 이다. 제어 구조물은 감지기와 작동기를 모두 구비하고 있는 구조물인데 시스템의 상태나 변위를 감지하고 피드백제어 회로를 통하여 제어를 동시에 수행할 수 있다. 제어 구조물은 일반적으로 구조물과 감지기, 작동기가 확연하게 구조물과 구별되는 경우에 사용되는 용어이고 이에 반하여 감지기와 작동기가 구조

* 동국대학교 기계공학과

Tel. 02-2260-3705, Fax. 02-2263-9379

Email kwakm@dgu.edu

물의 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 제어를 내장하고 있어 구조물 자체가 능동적으로 상황 변화에 대처할 수 있는 보다 지능적인 구조물을 의미한다. 최근에는 지능구조물이라는 용어가 보편적으로 사용되고 있다.

지능구조물의 능동 진동 제어를 위해서는 효율적으로 진동을 억제할 수 있는 제어 이론의 개발이 필요하다. 그러나 제어가 실제 상황에 적용되기 위해서는 구조물의 상황을 좀더 정밀하게 예측할 수 있는 감지기과 제어력을 충분히 발휘할 수 있는 작동기의 개발이 더욱 더 필수적이다. 이와 같은 필요성을 만족시키기 위해 다양한 형태의 감지기과 작동기, 재료와 메커니즘에 대한 연구가 제어 이론에 관한 연구와 더불어 동시에 진행되어 오고 있다. 그 결과 많은 종류의 새로운 감지기과 작동기의 출현을 보게 되었다. 전통적으로 구조물의 감지 장치로 사용되어 왔던 스트레인게이지(Strain Gage)나 가속도계(Accelerometer) 외에 분포감지기의 역할을 담당할 수 있는 압전폴리머(Polymeric Piezoelectric Polyvinylidene Fluoride, PVDF) 감지기가 개발되었고, 부저나 스피커로 사용되었던 압전세라믹 또한 감지기로 개발되었다. 압전폴리머와 압전세라믹 재료는 작동기 재료로도 사용될 수 있는데 특히 압전세라믹판은 복합 재료의 층(Layer)안에 삽입할 수 있어 구조물과 감지기/작동기가 일체로 된 지능 구조물의 구현에 적합하다. 이외에 구조물의 능동 제어에 사용되는 작동기 재료로는 형상 기억 합금(Shape Memory Alloy, Nitinol), 전자기 유체(Electromagnetic Fluid), 전자장을 이용한 작동기(Magnetostrictive Material)가 개발되었다. 기계적인 장치로는 Proof-Mass Actuator, Reaction Wheel 등이 있다. 본 논문에서는 이들 중 간편성과 효율성이 높아 가장 활발하게 사용되고 있는 압전세라믹 감지기과 작동기를 이용한 진동제어에 대해 살펴보고자 한다. 많은 논문들을 살펴보고 연구동향을 살펴보았지만 필자가 인식하지 못하여 누락된 중요한 논문들이 있을 것이다. 이는 고의적인 것이 아니고 조사 시간상의 제약으로 인한 것임을 밝힌다. 본 논문을 토대로 압전재료를 이용한 능동 진동 제어에 관한 연구가 국내에서 보다 활발히 이루어지기를 바란다.

2. 압전 현상

압전재료의 기본 성질인 압전 현상(Piezoelectricity)은 100여년전 Jacques Curie와 Pierre Curie에 의해 수정의 결정체에 관한 연구로부터 발견되었다. 압전현상으로 인해 기계적인 에너지가 전기적인 에너지로 변환되거나 반대로 전기적인 에너지가 기계적인 에너지로 변환될 수 있다. 이러한 압전현상을 Encarta Concise Encyclopedia[39]에서는 다음과 같이 정의하고 있다.

“결정체에 압력이 가해질 경우 결정체의 면들 사이에 걸쳐 전기적인 포텐셜이 발생하는 현상, 또는 전기장이 가해지는 경우 변형이 발생하는 현상을 가리킨다. 이 현상은 1880년 프랑스의 자크 퀴리(Jacque Curie)와 피에르 퀴리(Pierre Curie; 1859~1906)에 의해 발견되었으며, 결정체의 구조단위의 전기적인 극성을 유발하는 이온들의 변위에 의해 설명된다. 전기장이 가해지면 이온이 정전기력에 의해 움직이고 이로 인해 전체 결정체의 기계적인 변형이 일어난다. 압전결정체는 트랜스듀서, 기록 또는 재생용 픽업요소, 마이크에 사용된다.”

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[61]. 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. 이러한 응용 분야를 요약한 것이 Table 1 이다[2].

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

Table 1 Applications of piezoelectric materials

응용	특징
항공우주	모달 시험, 풍동과 충격튜브장비, 랜딩기어 유압, 로켓, 구조물, 분리 시스템, 절단-힘 연구
탄도학	연소, 폭발, 뇌관, 음압의 분포
의공학	정형외과 분야에서 뼈에 가해지는 힘 계측, 스포츠, 인간공학, 신경학, 심장학, 재활장애자
엔진 시험	연소, 가스 변환과 분사, 표시계, 동역학적 응력
공학	재료시험, 제어시스템, 원자로, 빌딩 구조물, 선박 구조물, 자동차 차대, 구조물시험, 완충기와 진동흡수장치, 동적응답시험
산업/공장	공작기계, 금속 절단, 프레스, 자동화공정, 기계손상감시시스템
기초장비 생산	전달시스템, 플라스틱사출, 로켓, 공구, 압축기, 엔진, 유연구조물, 기름/가스드릴링, 완충/진동시험기

이온들이 극성(polling) 축 방향으로 정렬하게 만 든다. 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 분포감지기나 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[26]. 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 작동기 등이 개발되어 사용되고 있다.

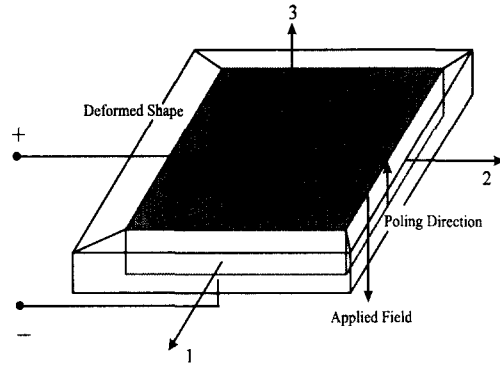


Fig. 1 Piezoelectric actions from applied voltages

압전재료의 기계적인 성질과 전기적인 성질을 정의하기 위한 좌표축 설정은 IEEE Standard on Piezoelectricity [57]의 규약을 따라 극성축을 3방향으로 정하고 가해진 전압장에 따라 음양을 정한다. 좌표축은 오른손 좌표계를 취하고 있다. 따라서 Fig. 1에 보이는 바와 같이 x축은 1방향, y축은 2방향, z축은 3방향이 된다. 압전성질을 포함한 구성방정식의 표현에 사용된 용어는 그 동안 재료 역학 분야에서 사용되어 온 용어와 다른 용어들이 사용되어 약간은 혼란스럽다. 또한 전기 분야에서조차도 용어들이 통일되지 않아 IEEE에서 이를 통일한 보고서[57]가 나온 것으로 보인다. 압전세라믹의 재료 성질에 대하여는 Jaffe의 책[59]에서 자세하게 다루고 있으나 진동 감지와 제어를 목적으로 하는 연구자들을 대상으로 쓰여진 책이 아니어서 이해하기가 곤란할 것으로 보인다. 압전재료에 관한 용어 설명은 IEEE 보고서[57]를 참조하기 바란다.

압전체를 작동기로 사용하는 예를 들어보자. Fig. 1의 압전체가 3방향으로 극화(poling)되어 있다면 재료의 극성 방향과 같은 3 방향으로 외부 전압을 걸어 주면 극성축 방향인 3 방향으로 인장되고 1,2 방향으로 수축을 한다. 만일 외부의 전압방향을 역으로 하면 변형의 방향도 모두 반대로 된다. 이를 Fig. 2에서 개략적으로 보여주고 있다.

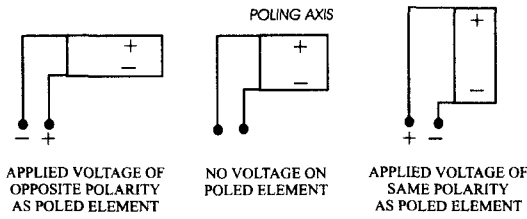


Fig. 2 Piezoelectric actions from applied voltages

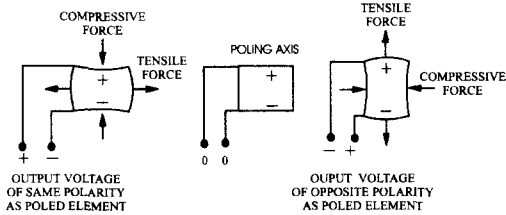


Fig. 3 Piezoelectric voltages from applied forces

압전체를 감지기로 사용하는 예를 들어보자. 만일 3 방향으로 압축을 하거나 1,2 방향으로 인장을 하면 이로 인해 전하가 발생한다. 전하로 인해 전류가 흐르고 전압차가 발생한다. 이를 Fig. 3에서 개략적으로 보여주고 있다.

3. 압전체의 구성방정식

압전체에 가해지는 전기장과 응력, 변형율과 전하량에 관한 구성방정식은 일반적으로 식(1)과 같이 표현하고 있다[57,103].

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

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_{ik}^0 는 부전도 계수 (dielectric permittivity matrix)이다. 각각의 아래 첨자는 Fig. 1에서 설명하였던 좌표축외에 Fig. 4에

보이는 바와 같이 회전을 포함하게 된다[88].

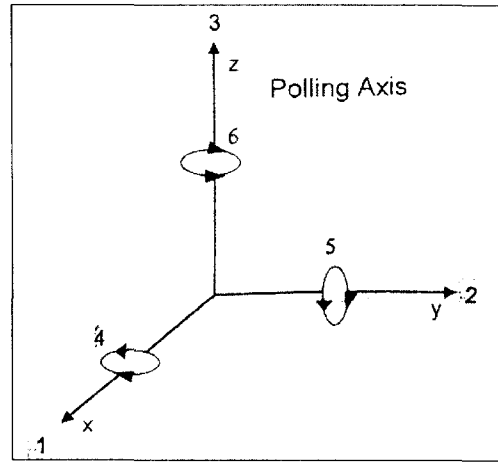


Fig. 4 Coordinate system for piezoelectric property

구성방정식, 식(1)에서 기계-전기 연성을 나타내는 물성치가 d_{ip} 이다. 이 물성치를 좀더 자세히 살펴 보기 위하여 1차원 문제를 고려해 보자. 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 같이된다.

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

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 살펴보면, d_{31} 이 전기-기계 연성에 관한 물성치임을 쉽게 확인할 수 있다. 따라서 d_{31} 값이 큰 압전체일수록 작은 전압으로 큰 변형율을 얻게 된다. 이와 같은 연성 효과로 인해 압전체를 포함한 구조물의 운동 방정식은 전기적인 항을 포함하게 된다. Brennan and Day[16]은 압전감지기와 작동기의 성질을 정리하고 실험으로 그 성능을 증명하였다.

4. 압전체가 포함된 지능구조물의 모델링

압전재료 자체의 모델링은 변분법을 사용하여 구할 수 있음을 Nisse[82]가 보여주었는데 구조물과의 연성 효과가 아닌 전기 재료와 탄성 재료가 결합된 압전재료 그 자체의 진동 해석을 위한 연구 결과이다. 이를 바탕으로 Holland[53]는 변분법을 다시 사용하여 압전세라믹 재료의 공진 특성에 관한 결과를 발표하였는데 그는 이론적인 결과가 실험 결과와 잘 일치함을 보여주었다. 변분법의 사용은 유한요소법의 개발을 유도하게 되는데 Allik and Hughes[4]가 압전재료가 진동할 경우에 대한 유한요소법의 정식화에 대하여 그 연구 결과를 발표하게 된다. 압전재료에 대한 새로운 유한요소법의 정식화보다는 상용으로 사용되고 있는 유한 요소 전산 프로그램을 차용하여 압전재료를 해석할 수 있는 방법을 McDearmon[77]이 제시하였다.

압전체가 구조물과 결합된 시스템에 대한 해석은 간단한 보의 해석으로부터 출발한다. Crawley and de Luis의 논문[29]은 압전작동기에 대한 초기 논문들 중의 하나인데 이 논문에서 그들은 압전재료와 탄성 구조물간의 연성을 묘사하는 두 개의 일차원 정적 모델을 제시하였다. 첫 번째 모델은 압전재료가 완벽하게 구조물에 접촉되어 있다고 가정하였고 두 번째 모델은 압전재료와 구조물 사이에 일정한 두께를 갖는 접착면이 존재한다고 가정하였다. 초기의 연구로는 또한 Hanagud, Obal and Calise[52]의 논문이 있는데 그들은 외팔보에 압전 작동기와 감지기를 부착한 시스템을 유한요소법을 사용하여 모델을 유도하였다. Crawley and Anderson [30]은 1차원 압전재료와 보구조물이 결합되어있는 경우에 대하여 모델화하는 기법을 토의하였고 실험을 통하여 이론 값과 비교하였다. Tzou and Tseng[96], Tzou, Tseng and Wang[97]은 압전재료의 분포성을 고려한 유한요소방법을 개발하여 압전감지기와 작동기가 결합된 평판에 대한 동적 특성을 조사하였다. Hagwood, Chung and von Flotow[50]는 구조물과 압전재료 그리고 전자부가 결합된 시스템인 전기-기계 시스템에 관한 운동 방정식을 유도하는데 있어 좀더 일반화된 접근 방법을 제시하였다. Bronowicki[17]는 압전재료와 구조물이 결합되어 있는 경우에 관한 이론을

정리하여 발표하였다. Banks and Smith[9]는 압전 세라믹 조각이 Shell, 평판, 보 등에 접착되어 있을 경우에 대한 모델화기법을 다루었고 Lazarus and Crawley[68]는 판 모양의 구조물이 압전 작동기와 감지기와 결합된 경우에 대하여 Rayleigh-Ritz 기법을 사용하여 모델을 구하였다. Shah, Joshi and Chan[89], Mitchell and Reddy[80], Chandrashekhara and Agarwal[25], Birman[15], Singh and Vizzini[95], Robbins and Reddy[87], Sun[94]은 유한요소법을 사용하여 복합재료판의 일부층에 압전세라믹 판이 삽입되었을 경우의 모델화에 관한 논문들을 발표하였다. Park, Walz and Chopra[84]은 보의 굽힘과 비틀림이 연성된 경우에 압전작동기의 영향을 조사하였고 Yeh and Chin [104]는 축에 비틀림 진동을 감지할 수 있는 압전감지기를 부착하였을 경우 축의 동적 특성이 어떻게 변화하는지를 조사하고 실험을 수행하여 이론적 결과와 비교하였다. Lin and Abatan[76]은 압전재료를 감지기 또는 작동기로 사용했을 경우에 현재 시장에 나와 있는 유한 요소 프로그램들을 어떻게 사용하는가에 대하여 토의하였다. Agrawal and Tong[1]은 평판에 압전 작동기를 삽입하였을 경우에 대한 모델화 방법에 대한 이론적 연구결과를 발표하였다. Miccoli, Concilio and Lecce[79]는 압전세라믹을 이용한 구조물의 진동 제어에 있어 유한요소법과 신경망을 이용한 모델링기법에 대하여 소개하였다. Hwang and Park[56]은 압전작동기와 감지기가 포함된 구조물의 유한요소모델링에 대해 연구했으며 Benjeddou[13]은 압전체가 포함된 구조물의 유한요소 모델링에 대한 연구 동향을 정리하여 발표하였다[13].

Denoyer and Kwak[34]의 논문에서 압전세라믹 감지기와 작동기가 부착된 외팔보의 동적 모델링에 대해 자세히 다루었는데 이론적인 주파수 응답 함수(Frequency Response Function)이 실험으로부터 얻은 주파수 응답과 잘 일치함을 보여주었다. 과문규, 라완규, 윤광준[109]은 복합재 격자 구조물에 압전세라믹 판을 부착하고 이를 유한요소법으로 해석하여 실험결과와 비교하였다. 저차의 모드에 대해서 비교적 정확한 모델을 얻을 수 있음을 입증하였다. 또한 남창호, 황재혁, 오승민[115]은 압전재료를 복합재 평판 내층에 부착한 경우를 고려하여 항공기 날개로의 적용을 다루었고 운동 방정식의 유도를 위하여 Rayleigh-Ritz 방법을 사용하

었다.

연속계인 구조물에 압전체를 결합시킬 경우 Rayleigh-Ritz방법이나 유한요소법을 사용해 이론적인 동적모델을 구할 수 있다. 이렇게 하면 유한 자유도를 갖는 이산계 운동 방정식과 감지 방정식이 다음과 같이 유도된다[34].

$$\begin{aligned} M\ddot{q} + Kq &= B_a G_a v_a \\ v_s &= G_s C_s^{-1} B_s^T q \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 M 과 K 는 각각 질량 행렬, 강성 행렬을 가리키며 압전감지기와 작동기에 의한 질량의 증가와 강성의 증가가 포함되어 있다. q 는 일반변위이며 B_a 는 개개의 압전작동기가 일반변위에 미치는 영향을 나타내는 영향 행렬이고 G_a 는 각각의 압전작동기에 대한 증폭앰프(Power Amp)의 이득에 해당한다. v_s 는 감지기의 전압 출력을 가리키며 G_s 는 감지기의 이득 그리고 C_s 는 압전감지기의 감도를 나타낸다. B_s 는 감지기의 영향 행렬을 나타내는데 만일 감지기와 작동기가 같은 크기이며 동일위치에 놓여있다면 $B_s = B_a$ 가 된다. 이 경우에 완벽한 동위치(Collocated) 제어가 성립하게 되어 이론적으로 볼 때 아주 바람직스러운 경우가 되나 실제적용에서는 제한 조건이 많아 이를 구현하기가 어렵다. 식(3)은 압전감지기가 전하앰프(Charge Amp)에 연결된 경우를 나타낸다. 이 경우 감지기 방정식은 일반변위에 비례하는 것으로 나타난다. 만일 전류앰프를 사용한다면 감지기의 출력은 일반 속도에 비례하게 된다. Kwak and Sciulli[63]는 이들 두 그룹의 센서와 앰프들을 사용하여 일반 변위와 속도를 제속하였고 이를 바탕으로 퍼지모직 제어를 구현하였다.

Rayleigh-Ritz 방법이나 유한요소법을 사용하여 운동방정식을 유도하는 경우 그 자유도가 제어를 설계하기에는 높기 때문에 저차의 모드를 대상으로 운동방정식을 축소하는 것이 일반적인 접근 방법이다. 이를 위해 고유치문제를 먼저 해석하고 고유치 문제의 해를 이용하여 다음과 같은 모달방정식을 유도한다[116].

$$\begin{aligned} \ddot{z} + \Lambda z &= -U^T B_a G_a v_a \\ v_s &= G_s C_s^{-1} B_s U z \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $U^T M U = I, U^T K U = \Lambda$ 를 사용하였으며 I 는 단위 행렬을 나타내고 Λ 는 고유치가 대각선으로 배열된 행렬을 나타낸다. 전체 고유벡터중 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[78].

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bv_a \\ v_s &= Cx + Dv_a \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 계수 행렬들은 식(4)와 비교하면 쉽게 구성분을 구할 수 있다.

대상 모드를 고려하여 차수를 줄인다하여도 실제로 제어를 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. 제어기 수가 한정되어 있는 경우의 안정성 문제를 Goh and Caughey[48]가 다루었다.

5. 능동진동제어 기법 연구 동향

앞에서 소개했듯이 압전효과관 압전소자에 압력

이 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 Hagood의 노트 [18]가 있는데 이 보고서는 압전세라믹을 이용한 능동감쇠에 관하여 이론적인 배경과 간략화 방법, 실제적인 제어 기법 등을 포함하고 있어 압전재료를 이용한 능동 진동 제어에 관한 연구를 시작하려는 사람들에게 훌륭한 참고서로서 활용될 수 있을 것이다.

5.1 션트(Shunt)회로를 이용한 제어

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[81]. 이와 같이 간단한 회로를 이용하여 감쇠효과를 얻는 기술을 이용한 상업적인 제품이 K2 스키[81]와 Copperhead 배트[10]이다. 스키 디자이너들은 저항과 콘덴서(RC) 션트(shunt) 회로를 사용하여 스키에 삽입된 압전체가 흡수한 에너지를 발산시켰다[81]. Active Control eXpers 사에서는 기계적인 진동 에너지를 전기적 에너지로 변화시키고자 션트한 압전재료를 Copperhead 배트에 삽입하였다. 이렇게 함으로써 충격을 완화시켜 배트의 스위트 스폿(sweet spot)을 좀더 넓게 만들었다 [10].

션트회로의 장점은 전원이 별도로 필요로 하지 않는다는 것이다. Fig. 5는 구조물에 부착된 압전세라믹에 간단한 전기 회로를 연결하여 션트에 의한 능동감쇠를 얻는 흐름도를 보여주고 있다. 션트회로는 일반적으로 저항(resistor), 유도코일(inductive element), 축전기(capacitive element), 스위칭 레กติ파이어(switcing rectifier)로 구성될 수 있다. 션트회로에 있어 저항은 열에 의해 에너지를 발산하여 감쇠효과를 주며, 유도코일은 기계적인 진동흡수장치와 같은 효과를 내고, 축전기는 압전 요소의 강성을 바꾸는 효과를 준다. 스위치를 사용하는 경우 에너지 변환을 주파수와 무관하게 수

행할 수 있다.

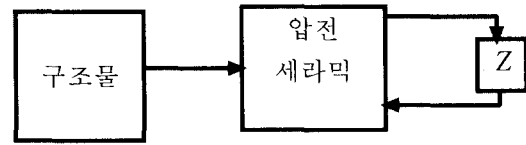


Fig. 5 Damping using shunt circuit

이와같은 션트회로를 이용한 감쇠구현 개념은 1979년에 Forward[42]가 처음으로 제시하였다. 이 논문에서 Forward는 전기적인 션트와 압전요소를 사용하여 진동제어를 할 수 있음을 보여주었는데 Forward는 실험에서 유도코일과 압전요소를 사용하였다. Forward and Swigert[43]는 광학 구조물의 한 종류인 Membrane 형태의 구조물에 압전재료를 이용하여 간단한 진동 제어 실험을 함으로써 댐핑을 증가시킬 수 있음을 증명하였다. Hagood and von Flotow[51]는 처음으로 압전 션트 회로에 대한 이론적인 해석을 수행하였는데 대상 회로는 저항회로와 저항-유도코일 회로였다. 그들은 압전세라믹이 저항과 연결되어 있는 경우에 나타나는 주파수 특성이 집탄성재료의 주파수 특성과 유사하고 압전세라믹이 저항-유도코일과 연결된 경우에는 진동흡수장치와 유사하게 전기적인 공진을 일으켜 진동을 억제할 수 있음을 보여주었다. 이런 간단한 션트회로를 통한 감쇠의 구현은 그 뒤에도 이어져 Aldrich, Hagood, von Flotow and Vos[3], Edberg, Bicos and Fechter[38]가 어떻게 감쇠를 구현하는 가를 보여주었다. von Flotow and Vos[98]는 능동 제어가 부착된 시스템에 대한 감쇠효과에 대하여 논하였다. Davis and Lesieutre[31]은 저항으로 션트된 경우의 모달 감쇠를 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. Hollkamp[54]는 여러 개의 모드를 제어할 수 있는 션트회로의 구현에 대해서 연구하였다. 이외에도 션트 회로를 이용한 감쇠에 대한 여러 연구 결과[74,100,101]가 발표되었다.

5.2 PPF(Positive Position Feedback) 제어

전원을 이용해 좀더 능동적으로 제어력을 높이면 션트회로에 의한 감쇠에 비해 보다 효과적인 능동 감쇠를 얻을 수 있고 보다 지능적인 제어를 적용할 수도 있다. 이 경우 압전감지기와 작동

기를 사용한 피드백 제어 시스템이 Fig. 6과 같이 구성된다. Fig. 6를 살펴보면 구조물에 부착된 압전감지기로부터 구조물의 변형을 감지하고 이를 제어로직을 통해 적절한 제어력을 계산하여 압전 작동기에 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 제어기[40,18]이다. PPF 제어기는 아날로그 회로도도 구성이 가능할 정도로 그 구조가 단순하며, 강인성이 보장되고 목표로 하는 진동모드를 확실하게 제어할 수 있다는 이점이 있다.

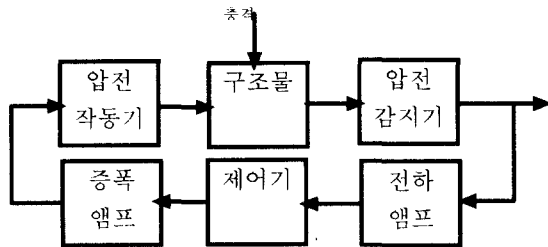


Fig. 6 Block diagram of Control

PPF 제어기는 Fanson and Caughey[40]가 처음 소개하였고 압전재료를 붙인 외팔보를 사용하여 실험적으로 PPF 제어기의 타당성을 증명하였다. 1자유도계에 관한 이론을 확장하여 Poh and Baz[85], Baz, Poh and Fedor[11], Baz and Hong[12]는 트러스 구조물의 진동을 억제하기 위하여 압전 세라믹 작동기를 쌓아올린 형태의 작동기를 사용하고 제어 기법으로는 Independent Modal Space Control (IMSC) 개념에 입각하여 각 모드를 제어하는 Modal Positive Position Feedback 제어 기법의 사용을 사용하였다.

Denoyer and Kwak [34] 외팔보에 대한 Multi-Input Multi-Output(MIMO) PPF 제어기 적용 문제를 논하였다. Griffin and Denoyer[49]는 압전 세라믹 작동기에 성공적으로 사용되어 온 PPF 제어회로를 소형화하는 방법을 발표하였다. 이외에도 PPF 제어기를 진동제어에 응용한 많은 연구 결과[64,65,105,107,117,128]가 있고 PPF제어기의

중요한 문제점 중의 하나인 조정 문제를 실시간으로 해결해보려는 노력[66,67,110,121, 123,129,130,131,132]도 진행중이다.

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 측정하는 경우에 합당하다. 이 제어 기법을 자세히 설명하기 위해서 1자유도의 진동계를 나타내는 2차 미분방정식을 예로 들어 보자.

$$\ddot{\eta} + 2\zeta\omega\dot{\eta} + \omega^2\eta = g\omega^2\xi \quad (6)$$

여기서 η 는 구조물의 모달좌표계를 나타내고 ζ 와 ω 는 구조물의 감쇠계수와 고유 진동수를 나타낸다. g 는 이득을 나타내며 ξ 는 필터의 거동을 나타내는 좌표계이다. PPF 제어 보상회로식은 구조물의 운동방정식과 비슷한 형태로 주어진다.

$$\ddot{\xi} + 2\zeta_f\omega_f\dot{\xi} + \omega_f^2\xi = \omega^2\eta \quad (7)$$

여기서 ζ_f 와 ω_f 는 PPF 필터의 댐핑계수와 고유 진동수를 나타낸다. 이 보상 회로를 Laplace 변환을 사용하여 나타내면 다음과 같이 된다.

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

이식은 필터이론에서 사용하는 기본적인 저주파 통과 필터(Low-Pass Filter)와 동일한 형태이며 코너주파수에서 90도의 위상차를 갖는다. 이를 이용해서 감쇠를 구현한다. PPF 회로는 Op Amp를 사용하여 간단하게 회로를 구성할 수 있다[18]. 근궤적(Root-Locus)에서 볼 수 있듯이 이 회로는 개루프 극점(Pole)을 허수 축에서 멀리 이동시키는 역할을 한다. 그러나 이득이 너무 커지면 불안정계가 될 수 있어 이득을 결정하는데 있어 주의하여

야 한다. PPF 제어기의 적용은 $\omega_f = \omega$ 로 만들어 가장 심각한 진동을 유발하는 고유 진동 모드를 개별로 제어하게 된다. 실제 구조물에서는 물론 무한개의 극점과 영점(Zero)들이 있는데 고유 모습들간의 연성이 약하고 영점과 극점 간에 충분한 주파수 간격이 존재할 시에는 구조물의 특정 고유 모드를 다른 모드들에 영향을 주지 않으면서 제어할 수 있다. 여러 개의 모드를 제어하고자 한다면 개개의 모드를 제어할 수 있는 PPF 제어기를 설치하여 비중앙화제어(Decentralized Control) 개념 하에 몇 개의 모드를 제어할 수도 있고 아니면 Pseudo-Inverse 에 근거 실제 적용되는 힘을 산출하여 적용할 수도 있다 [34].

Garcia, Dosch and Inman[45], Dosch, Inman and Garcia[36], Inman and Garcia[58]는 자아 감지 가능 작동기 (Self-Sensing Actuator) 의 설계에 관해 논하면서 PPF 제어 설계와의 연계에 관한 논문을 발표하였다. 라원규, 곽문규[118]은 이와 같은 자아감지작동기의 문제점을 좀더 심도있게 토론하였다.

5.3 기타 제어기법

Hanagud, Obal and Calise[52]은 능동 제어 기법으로서 Rate Feedback, Modal Feedback, Optimal Output Feedback 제어 기법을 사용하였다. Babu and Hanagud[6]은 압전 감지기와 작동기를 사용하는 제어기의 강인성 문제를 다루었다. 자아감지작동기를 이용한 연구논문은 [35,37]이 있다. Tzou and Gadre[95]는 압전폴리머를 이용한 진동 억제에 있어서 위상각과 계인을 변화시키는 제어 기법을 사용하였다. Burke and Hubbard[22]는 Lyapunov의 직접법을 사용하여 여러 형태의 경계 조건을 갖는 보들에 대한 제어 방법들을 유도하고 설계 지침을 제시하였다. Babu and Hanagud[6]는 압전 감지기/작동기를 포함하는 구조물의 진동 제어를 위하여 μ Synthesis 기법을 이용 Robust 제어기를 설계하였다. Lazarus and Crawley[68]는 Linear Quadratic Gaussian(LQG) 제어와 Optimal Projection Compensator를 사용한 실험 결과를 제시하고 있다. Li, Beigi, Li and Liang[75]은 Diamod Turning Lathe의 위치 제어에 있어 압전 작동기를 사용하고 제어 기법으로는 Learning Self-Tuning Regulator를 사용하여 파라미터를 추적하는 방법을 제시하

였다. Garcia and Inman[46,47], Leo and Inman[73]은 탄성체를 회전시키는 경우에 압전감지기/작동기를 사용하여 진동을 억제하는 방법을 소개했다. Khorrami and Zeinoun[60]는 Flexible Multibody의 Slewing 문제를 다루면서 진동 제어를 위하여 Decentralized Frequency Shaping 과 Self-Tuning Adaptive 제어 기법을 사용하여 회전시 진동을 억제하는 방법에 대하여 연구하였다. Pota, Alberts and Peterson[86]는 H^∞ 제어 기법을 이용한 연구 결과를 발표하였다. Kwak, Denoyer and Sciulli[62], Tzou, Tseng and Wang[97], 곽문규, 남상현[108]은 회전본의 모델링과 제어에 대한 연구 결과를 발표하였다.

Impedance Matching 제어기법에 관한 연구도 활발히 진행되어 Fanson, Lurie, O'Brien and Chu[41]가 System Identification 기법과 Impedance Matching 기법에 대하여 논하였고 Betros, Alvarez-Salazar and Bronowicki[14]는 Impedance Matching 제어기법이 압전재료를 사용한 진동 제어 기법으로 사용될 수 있음을 보였다. Paige, Scott, Weisshaar[83]는 압전재료를 복합재료판에 붙여 Flutter를 제어하는 방법을 소개하였는데 제어 기법으로는 LQR(Linear Quadratic Regulator)이 사용되었다.

진동제어를 위하여 압전재료를 도입한 개념하에 쓰여진 초기논문들중의 하나가 Bailey and Hubbard의 논문[7]인데 그들은 금속 외팔보 윗면 전체에 압전폴리머를 접착시켜 작동기로써의 역할이 가능함을 보였다. Bailey and Hubbard는 압전폴리머를 외팔보에 특수한 형태로 분포시켜 진동 제어를 하는 Spatial Filter의 개념을 도입하였는데 이 개념을 더욱더 확장시켜 Burke and Hubbard[21]가 다시 압전폴리머를 이용한 진동 제어에 있어서 길이에 따라 형상이 바뀌는 제어기를 사용하는 방법에 대한 논문을 발표하였다. 또한 Lee and Moon[70]는 복합재료판의 굽힘과 비틀림진동제어를 위한 감지가 와 작동기의 설계에 관하여 Burke and Hubbard [23,24]는 박판의 상하 진동 제어기의 설계를 압전폴리머를 평면상에 특수한 형상으로 분포하여 어떤 진동 모드에 대하여 감지기와 작동기로서의 역할을 극대화하는 방법을 발표하였다. 이는 Modal Sensor/Actuator 또는 Spatial Filter의 개념에 근거한 접근 방법으로 압전폴리머와 압전 세라믹의 특성을 이용한 방법이라고 말할 수 있

다. 같은 개념 하에 Lee, Chiang, O'Sullivan[69,71,72]도 압전폴리머를 이용하여 각각의 모드를 감지하고 각각의 모드를 제어할 수 있는 Modal Sensor/Actuator의 설계에 관하여 연구하고 간단한 속도 피이드백으로 임계감쇠를 얻을 수 있음을 보여주었다. Sullivan, Hubbard, Burke[93]는 직사각형 단순 지지 평판의 진동 제어 위한 분포 감지기와 작동기의 최적 설계에 관한 논문을 발표하였다. D'Crus[32]는 파넬의 진동을 압전작동기를 이용하여 제어하는 방법에 대한 연구 결과를 발표하였다.

제어 설계에 관한 국내의 연구 결과로는 황우석과 박현철[133]이 압전감지기/작동기가 결합된 유연체의 진동 제어 문제를 다루면서 관측성, 제어성, 안정성등 제어 성능 면에서의 조건을 다루었고 제어 성능을 높일 수 있는 제어 설계 방법을 제시하였다. 김종선[112]은 경계 제어(Boundary Control)를 사용하는 진동 제어 방법을 제시하고 Spillover의 영향과 감지기의 최적 위치 결정 방법을 토의하였으며 실험 결과를 제시하고 있다. 남창호, 황재혁과 오승민[115]은 LQR를 적용하였고 진동 제어 성능을 극대화하기 위한 최적화 기법을 사용하여 최적의 설계 파라미터를 결정할 수 있음을 보였다. 김승한, 최승복과 정재천[111]은 압전 필름을 이용한 외팔보의 능동 진동 제어를 Bang-Bang 제어 방법들을 사용하여 행하였다. 윤광준[124]과 윤광준, 이영재와 김현수[125]는 압전 세라믹 작동기와 폴리머 감지기를 부착한 복합 재료 외팔보의 능동 진동 억제를 다루었는데 제어 방법으로는 PD(Proportional plus Derivative)가 사용하였다. 이외에도 압전작동기와 감지기를 이용한 연구 결과[113,114,119,120,122,127]가 발표되고 있다.

de Luis and Crawley[33], Crawley and de Luis[28]는 우주 구조물의 진동 제어를 실현하기 위하여 표면에 부착된 압전재료를 갖는 알루미늄 보, 압전세라믹이 삽입된 복합 재료들에 대하여 압전 작동기가 전체 구조물에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였고 Edberg, Bicos and Fechter[38]는 압전재료를 이용하여 Active-Damping Strut를 제작하였고 Fanson, Lurie, O'Brien and Chu[41]는 JPL의 트러스 구조물에 압전재료로 만들어진 작동기 멤버를 삽입하여 진동 제어를 실험하였으며 Poh and Baz[85]는 압전 세라믹을 쌓아올린 형태

의 작동기를 사용하여 트러스 구조물의 진동을 억제하였는데 Shibuta, Morino, Shibayama and Sekine[91], Fujita, Tagawa, Murai, Shibuya, Takeshita and Takahashi[44]는 압전재료를 이용하여 트러스 멤버를 능동작동기로 만드는 방법을 소개하였다. Lee, Chiang and O'Sullivan[72]은 전류앰프(Current Amplifier)를 이용 Strain Rate를 감지할 수 있는 감지기의 설계에 대한 논문을 발표하였다. Collins, Padilla, Notestine and von Flotow[27]는 압전 필름 감지기의 제작에 관해 다루었으며 Modal 감지기를 Flexible Multibody 에 적용하여 실험 결과를 발표하였다. Bronowicki 등 [17,19,20]은 위성체의 mast 로 사용하기 위하여 복합 재료 구조물에 압전세라믹을 삽입시킨 형태의 구조물을 제작하였고 능동 제어 기법을 적용하여 진동 제어 실험을 행하였다. Anderson, Moore, Fanson and Ealey[5]은 압전재료와 Electrostrictive 작동기를 이용한 능동멤버의 제작에 대하여 논하였다.

그 외 특이할 만한 논문으로는 수동댐핑과 능동댐핑을 결합시켜 능동 제어가 파손되었을 시에도 어느 정도 댐핑을 보장할 수 있는 시스템의 설계에 관한 Shen[90]의 보고서가 있다. 이렇게 수동댐핑과 능동댐핑이 결합된 시스템을 ACLD(Active Constrained Layer Damping)이라고 부르는데 Hollkamp and Gordon[55]은 압전세라믹이 삽입된 경우의 ACLD에 관한 연구 결과를 발표하였다. 압전재료의 특성을 활용한 압전 모터의 개발도 연구가 활발히 진행되고 있는데 로봇의 관절운동에 압전 모터를 사용한 연구 결과가 Wu, Bao, Varadan[102]에 의해 발표되었다. 음향제어에 관한 논문으로는 Banks, Fang, Silcox and Smith[8]의 연구결과가 있다.

최근에 개발된 제어 기법을 사용하고자 한다면 디지털제어가 필수적인데 LQR, LQG, μ Synthesis, H^∞ 제어 등의 경우는 마이크로 프로세서를 이용하여 제어 실험을 할 수 있다. 그러나 이 경우 A/D, D/A Converter에서 발생하는 Time-Delay, Anti-Aliasing Filter에서 발생하는 위상각의 변화 등 아날로그 제어에서 볼 수 없었던 현상들이 나타나게 된다. 그리고 A/D, D/A 의 Sampling Speed 는 제한이 있어 많은 수의 고차진동 모드를 제어할 수 없다. 최근 DSP Chip 의 개발로 피이드백 제어 주기가 짧아지고 있으므로 좀 더 많은 수의 진동 모드를 제어할 수 있을 것으로

보인다. 참고로 Adaptive Control, 퍼지로지직 제어, 신경망제어등은 Parallel Processing 이 요구되는 회로라 데이터 처리를 빨리 할 수 있는 마이크로 프로세서를 이용해야 한다.

6. 결론

개략적이거나 압전재료를 이용한 능동 진동 제어에 관한 연구 동향과 연구 결과를 살펴보았다. 능동 진동 제어에 사용되고 있는 감지기/작동기들 중 압전세라믹은 몇 가지 장점을 지니고 있어 그 적용에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있는 현실이며 실제 구조물로의 적용이 이루어지고 있다. 압전세라믹을 이용한 진동제어는 박판으로 이루어진 국부구조물의 진동제어에 적합하며 그래서 자동차의 진동소음제어, 위성체 태양판의 진동제어에 적합하다. 겹쳐놓은 형태의 압전세라믹은 트러스 구조물의 능동멤버로도 활용할 수 있다. 이렇게 겹쳐놓은 형태의 압전세라믹 구조는 진동 고립(Vibration Isolation)을 원하는 장비의 지지대로 응용할 수 있다.

최근까지도 압전세라믹을 이용한 진동 제어는 주로 외팔보, 또는 평판과 같은 단순한 기하학적 형상을 가진 구조물에 국한되어 연구가 진행되어 왔고 제어 기법 또한 그 동안 전기 제어 분야에서 개발되어 온 기법들을 적용하는 현상을 보였다. 구조물의 자유도가 무한대인 점을 고려할 때 앞으로 구조물에 합당한 제어 기법의 개발이 요망된다. 이 논문에서 소개한 선트회로를 이용한 능동 감쇠와 PPF 제어 기법은 그 동안 개발되어온 제어기 중에서 실용성이 높은 방법이다.

압전세라믹 감지기와 작동기의 설치는 그 동안 압전세라믹 판을 직접 구조물에 접촉시킨 형태로 진행되었는데 새로운 형태의 압전세라믹 작동기의 개발이 시급하다. 이는 높은 전압을 필요로 하는 진동 제어는 필수적으로 커다란 부대 시설을 요구하게 됨으로 전압을 높이지 않고도 진동 제어를 효율적으로 할 수 있는 압전세라믹의 제조가 필요하다고 하겠다. 최근에 압전세라믹의 제어력을 높이고자 하는 노력이 진행중이다. 조만간에 보다 강력한 압전세라믹 작동기가 출현할 것으로 보인다. 이런 작동기가 개발된다면 진동제어를 보다 효과적으로 수행할 수 있을 것으로 예상된다.

압전세라믹을 진동 제어에 사용하는데 있어 문제점은 전기회로 지식과 재료에 대한 이해라고 말할 수 있다. 따라서 지능구조물을 연구하는 사람들은 타분야 전공자, 특히 전기 제어 및 재료 전문 분야의 전문가들과 손잡고 일을 진행해야 할 것으로 보인다.

참고문헌

1. Agrawal, S.K. and Tong, D., "Modeling and Shape Control of Piezoelectric Actuator Embedded Elastic Plates," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 5, pp. 514-521, 1994.
2. Ahmadian, M. and DeGuilio, A.P., "Recent Advances in the Use of Piezoceramics for Vibration Suppression," The Shock and Vibration Digest, Vol. 33, No. 1, pp. 15-22, 2001.
3. Aldrich, J., Hagood, N.W., Von Flotow, A. and Vos, D.W., "Design of Passive Piezoelectric Damping for Space Structures," SPIE Vol. 1917 Smart Structures and Intelligent Systems, pp. 692-705, 1993.
4. Allik, H. and Hughes, J.R., "Finite Element Method for Piezoelectric Vibration, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 2, pp. 151-157, 1970.
5. Anderson, E.H., Moore, D.M., Fanson, J.L., Ealey, M.A., "Development of an Active Member Using Piezoelectric and Electrostrictive Actuation for Control of Precision Structures," "
6. Babu, G.L.N. and Hanagud, S., "Robustness and Vibration Control of Adaptive Structures by the Use of Piezoelectric Sensors and Actuators," AIAA-91-1236-CP, pp. 2269-2279, 1991.
7. Bailey, T. and Hubbard Jr., J.E., "Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 8, No. 5, pp. 605-611, 1985.
8. Banks, H.T., Fang, W., Silcox, R.J. and Smith, R.C., "Approximation Methods for Control of Acoustic /Structure Models with Piezoceramic Actuators," NASA Contractor Report, AD-A244

- 350, pp. 1-28, 1992.
9. Banks, H.T. and Smith, R.C., "The Modeling of Piezoceramic Patch Interactions with Shells, Plates and Beams," NASA Contractor Report, pp. 1-31, 1993,
 10. "Batter Up! Piezo Dampers Take Sting Out of Swing," *Machine Design*, Vol. 70, No. 15, pp. 46-47.
 11. Baz, A., Poh, S., and Fedor, J., "Independent Modal Space Control with Positive Position Feedback," *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 114, 96-103, 1992.
 12. Baz, A., and Hong, T.H., "Adaptive Control of Flexible Structures Using Modal Positive Position Feedback," *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, Vol. 11, 231-253, 1997.
 13. Benjeddou, A., "Advances in Piezoelectric Finite Element Modeling of Adaptive Structural Elements: A Survey," *Computers & Structures*, Vol. 76, pp. 347-363, 2000.
 14. Betros, R.S, Alvarez-Salazar, O.S. and Bronowicki, A.J., "Experiences with Active Damping and Impedance Matching Compensators," *SPIE Vol. 1917 Smart Structures and Intelligent Systems*, pp. 856-869, 1993.
 15. Birman, V., "Theory of Sandwich Plates with Piezoelectric Reinforcements," *SPIE Vol. 1917 Smart Structures and Intelligent Systems*, pp. 461-472, 1993.
 16. Brennan, M.J. and Day M.J., "Piezoelectric Actuators and Sensors," *IUTAM Symposium on the Active Control of Vibration*, University of Bath, U.K., 1994.
 17. Bronowicki, A.J., "Advanced Composites with Embedded Sensors & Actuators (ACESA)," *US Airforce Phillips Lab Internal Report*. 1992.
 18. Bronowicki, A.J., Betros, R.S. and Hagood, N.W., "Active Damping Using Piezoceramics," *SPIE's 1993 North American Conference on Smart Structures, Short Course Notes*. 1993.
 19. Bronowicki, A.J., Betros, R.S., Dvorsky, G.R., Wyse, R.E., Innis, J.W. and Kuritz, S.P., "Advanced Composites with Embedded Sensors and Actuators," *PL-TR-93-3017*, 1993.
 20. Bronowicki, A.J., Innis, J.W., Betros, R.S. and Kuritz, S.P., "ACESA Active Member Damping Performance," *SPIE Vol. 1917 Smart Structures and Intelligent Systems*, pp. 836-847, 1993.
 21. Burke, S.E. and Hubbard Jr., J.E., "Active Vibration Control of a Simply Supported Beam Using a Spatially Distributed Actuator," *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 25-30, 1987.
 22. Burke, S.E. and Hubbard Jr., J.E., "Distributed Actuator Control Design for Flexible Beams," *International Federation of Automatic Control*, Vol. 24, No. 5, pp. 619-627, 1988.
 23. Burke, S.E. and Hubbard Jr., J.E., "Spatial Filtering Concepts in Distributed Parameter Control," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 112, pp. 565-573, 1990.
 24. Burke, S.E. and Hubbard Jr., J.E., "Distributed Transducer Vibration Control of Thin Plates," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 90, No. 2, pp.937-944, 1991.
 25. Chandrashekhara, K. and Agarwal, A.N., "Dynamic Modeling of Piezoelectric Laminated Plates Using Finite Element Method," *SPIE Vol. 1917 Smart Structures and Intelligent Systems*, pp. 451-460, 1993.
 26. Choi, S.-B., Cheong, C.-C., and Kim, S.H., "Control of Flexible Structures by Distributed Piezofilm Actuators and Sensors," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 6, pp. 430-435, 1995.
 27. Collins, S.A., Padilla, C.E., Notestine, R.J. and Von Flotow, A.H., "Design, Manufacture, and Application to Space Robotics of Distributed Piezoelectric Film Sensors," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 15, No. 2, pp. 369-403, 1992.
 28. Crawley, E.F. and de Luis, J., Experimental, "Verification of Distributed Piezoelectric Actuators for Use in Precision Space Structures," *Proceedings of the 27th SDM Conference*. 1986.

29. Crawley, E.F. and de Luis, J., "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures," AIAA Journal, Vol. 25, No. 10, pp. 1373-1385, 1987.
30. Crawley, E.F. and Anderson, E.H., "Detailed Models of Piezoceramic Actuation of Beams," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 1, No. 1, pp. 4-25, 1990.
31. Davis, C.L., and Lesieutre, G.A., "A Modal Strain Energy Approach to the Prediction of Resistively Shunted Piezoceramic Damping," Journal of Sound and Vibration, Vol. 184, 129-139, 1995.
32. D'Crus, J., "The Active Control of Panel Vibrations with Piezoelectric Actuators, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 4, 1993.
33. de Luis, J. and Crawley, E.F., "Experimental Results of Active Control on a Prototype Intelligent Structure," AIAA-90-1163-CP, pp. 2340-2350, 1990.
34. K. K. Denoyer and M. K. Kwak, "Dynamic Modeling and Vibration Suppression of a Slewing Active Structure Utilizing Piezoceramic Sensors and Actuators," Journal of Sound and Vibration, Vol. 189, No. 1, pp. 13-31, Jan. 1996.
35. Dongi, F., Dinkler, D. and Kroplin, B., "Active Panel Flutter Suppression Using Self-Sensing Piezoactuators," AIAA Journal, Vol. 34, No. 6, pp. 1224-1230, 1996.
36. Dosch, J.J., Inman, D.J. and Garcia, E., "Measurement of Strain and Stress in a Piezoelectric Actuator for Collocated Control," Institute of Physics Publishing, pp. 195-198, 1992.
37. Dosch, J.J., Inman, D.J., and Garcia, E., "A Self-Sensing Piezoelectric Actuator for Collocated Control," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 3, 1992.
38. Edberg, D.L., Blcos, A.S. and Fechter, J.S., "On Piezoelectric Energy Conversion for Electronic Passive Damping Enhancement," Damping '91 Conference, San Diego, CA. 1991.
39. Encarta Concise Encyclopedia. Available at <http://encarta.msn.com>.
40. Fanson, J.L. and Caughey, T.K., "Positive Position Feedback Control for Large Space Structures," AIAA Journal, Vol. 28, No. 4, pp. 717-724, 1990.
41. Fanson, J.L., Lurie, B.J., O'Brien, J.F. and Chu, C.C., "System Identification and Control of the JPL Active Structure," AIAA-91-1231-CP, pp. 2247-2254, 1991.
42. Forward, R.L., "Electronic Damping of Vibrations in Optical Structures," Applied Optics, Vol. 18, No 5, pp. 690-697, 1979.
43. Forward, R.L. and Swigert, C.J., "Electronic Damping of Orthogonal Bending Modes in a Cylindrical Mast - Theory," Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 18, pp. 5-10, 1981.
44. Fujita, T., Tagawa, Y., Murai, N., Shibuya, S., Takeshita, A. and Takahashi, Y., "Active Microvibration Control System Using Piezoelectric Actuator," Second Joint Japan/U.S. Conference on Adaptive Structures, pp. 357-371, 1991.
45. Garcia, E., Dosch, J and Inman, D.J., "The Application of Smart Structures to The Vibration Suppression Problem," Second Joint Japan/U.S. Conference on Adaptive Structures, pp. 332-339, 1991.
46. Garcia, E. and Inman, D.J., "Advantages of Slewing an Active Structures," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 1. 1990.
47. Garcia, E. and Inman, D.J., "Modeling of the Slewing Control of a Flexible Structures," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 1, 1990.
48. Goh, C.J. and Caughey, T.K., "On the Stability Problem Caused by Finite Actuator Dynamics in the Collocated Control of Large Space Structures," International Journal of Control, Vol. 41, 787-802, 1985.
49. Griffin, S.F. and Denoyer, K.K., "Smart Patch Piezoceramic Actuator Issues," The Fifth NASA/Dod CSI Technology Conference. 1992.
50. Hagood, N.W., Chung, W.H., and von Flotow,

- A., "Modelling of Piezoelectric Actuator Dynamics for Active Structural Control," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 1, No. 3, 1990.
51. Hagood, N.W. and von Flotow, A., "Damping of Structural Vibrations with Piezoelectric Materials and Passive Electrical Networks," *Journal of Sound and Vibration*. Vol 146, No 2, pp. 243-268, 1991.
52. Hanagud, S., Obal, M.W., and Calise, A.J., "Optimal Vibration Control by the Use of Piezoceramic Sensors and Actuators," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 15, No. 5, pp. 1199-1206, 1992.
53. Holland, R., "Resonant Properties of Piezoelectric Ceramic Rectangular Parallelepipeds," , Vol. 43, No. 5, pp 988-997, 1967.
54. Hollkamp, J.J., "Multimodal Passive Damping Enhancement," *J. of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 5, No. 1, pp. 49-57, 1994.
55. Hollkamp, J.J. and Gordon, R.W., "An Experimental Comparison of Piezoelectric Constrained Layer Damping," *Smart Materials and Structures*, Vol.5, 715-722, 1996.
56. Hwang, W.-S. and Park, H.C., "Finite Element Modeling of Piezoelectric Sensors and Actuators," *AIAA Journal*, Vol. 31, No. 6, pp. 930-937, 1993.
57. IEEE Std 176-1987, "IEEE Standard on Piezoelectricity," *The Institute of Electrical and Electronics Engineers*, pp. 8-14, 1987.
58. Inman, D.J. and Garcia, E., "Smart Structures for Vibration Suppression," *Institute of Sound and Vibration Research*, pp. 137-155, 1991.
59. Jaffe Jr., B., Cook Jr., W.R. and Jaffe, H., *Piezoelectric Ceramics*, Academic Press. 1971.
60. Khorrani, F. and Zeinoun, I.J., "Rapid Slewing and Pointing of a Flexible Structure with Embedded Piezoceramics," *SPIE Vol. 1917 Smart Structures and Intelligent Systems*, pp. 25-36, 1993.
61. Kistler Online Website for Technology and Piezoelectric Theory. Available at <http://www.kistler.com>
62. Kwak, M.K., Denoyer, K.K. and Sciulli, D., "Dynamics and Control of a Slewing Active Beam," *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 18, No. 1, pp. 185-186, 1995.
63. Kwak, M.K. and Sciulli, D., "Fuzzy-Logic Based Vibration Suppression of a Slewing Active Structure Utilizing Piezoceramic Sensors and Actuators," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 191 No. 1, pp. 15-28, March 1996.
64. M. K. Kwak, Kwang-Joon Yoon and Wan-Kyu Ra, "Active Vibration Suppression of a Smart Grid Structure by the Multiple Positive Position Feedback Control," *Asia-Pacific Vibration Conference '97*, Kyungju Korea, Nov. 9-13 1997.
65. M. K. Kwak and Sang-Bo Han, "Application of Genetic Algorithm to the Determination of Multiple Positive Position Feedback Controller Gains for Smart Structure," *SPIE's 5th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, San Diego California USA, March 1-5 1998.
66. M. K. Kwak and T.-S. Shin, "Real-Time Automatic Tuning of Vibration Controllers for Smart Structures by Genetic Algorithm," *SPIE's 6th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, Newport Beach, California USA, March 1-5 1999.
67. M. K. Kwak and S. Heo, "Real-Time Multiple Parameter Tuning of PPF Controllers for Smart Structures Genetic Algorithms," *SPIE's 7th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, Newport Beach, California USA, March 5-9 2000.
68. Lazarus, K.B. and Crawley, E.F., "Multivariable High-Authority Control of Plate-Like Active Structures," *AIAA Paper 92-2529*, 1992.
69. Lee, C.K., Chiang, W.W., and O'Sullivan, T.C., "Piezoelectric Modal Sensor and Actuators Achieving Critical Active Damping on a Cantilever Plate," *IBM Research Report*, pp. 2018-2026, 1989.
70. Lee, C.K. and Moon, F.C., "Laminated Piezopolymer Plates for Torsion and Bending

- Sensors and Actuator," Journal of Acoustical Society of America, Vol. 85, No. 6, pp. 2432-2439, 1989.
71. Lee, C.K., Chiang, W.W., and O'Sullivan, T.C., "Piezoelectric Modal Sensor /Actuator Pairs for Critical Active Damping Vibration Control," Journal of Acoustical Society of America, Vol. 90, No. 1, pp. 374-384, 1991.
 72. Lee, C.K., Chiang, O'Sullivan, T.C., and Chiang, W.W., "Piezoelectric Strain Rate Sensor and Actuator Designs for Active Vibration Control," AIAA-91-1064-CP, pp. 2197-2207, 1991.
 73. Leo, D.J. and Inman, D.J., "Point Control and Vibration Suppression of a Slewing Flexible Frame," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 17, 528-536, 1994.
 74. Lesieutre, G. A., "Vibration Damping and Control Using Shunted Piezoelectric Materials," The Shock and Vibration Digest, Vol. 30, 187-195, 1998.
 75. Li, C.J., Beigi, H.S.M., Li, S. and Liang, J., "Nonlinear Piezo-Actuator Control by Learning Self-Tuning Regulator," Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 115, pp. 720-723, 1993.
 76. Lin, M.W. and Abatan, A.O., "Application of Commercial Finite Element Codes for the Analysis of Induced Strain-Actuated Structures," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, pp. 869-875.
 77. McDearmon, G.F., "The Addition of Piezoelectric Properties to Structural Finite Element Programs by Matrix Manipulations," Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 76, No. 3, 1984.
 78. Meirovitch, L., Dynamics and Control of Structures, John Wiley & Sons. 1989.
 79. Miccoli, G., Concilio, A. and Lecce, L., "Research Activity on Noise and Vibration Active Control by Piezoceramic Transducers," Proceedings of the 12th International Modal Analysis Conference, pp. 606-612, 1994.
 80. Mitchell, J.A. and Reddy, J.N., "Study of The Effect of Embedded Piezoelectric Layers in Composite Cylinders," SPIE Vol. 1917 Smart Structures and Intelligent Systems, pp. 440-450, 1993.
 81. Mulcahey, B. and Spangler, R.L., "Piezos Tame Tough Vibrations," Machine Design, Vol. 70, No. 4, 60-63, 1998.
 82. Nisse, E.P.E., "Variational Method for Electroelastic Vibration Analysis," IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, Vol. Su-14, No. 4, pp. 153-160, 1967.
 83. Paige, D.A., Scott, R.C. and Weisshaar, T.A., "Active Control of Composite Panel Flutter Using Piezoelectric Materials," SPIE Vol. 1917 Smart Structures and Intelligent Systems, pp. 84-97, 1993.
 84. Park, C., Walz, C. and Chopra, I., "Bending and Torsion Models of Beams with Induced Strain Actuators," SPIE Vol. 1917 Smart Structures and Intelligent Systems, pp. 192-1216, 1993.
 85. Poh, S. and Baz, A., "Active Control of a Flexible Structure Using a Modal Positive Position Feedback Controller," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 1. 1990.
 86. Pota, H.R., Alberts, T.E., and Peterson, I.R., "H ∞ Control of Flexible Slewing Link with Active Damping," SPIE Vol. 1917 Smart Structures and Intelligent Systems, pp. 25-36, 1993.
 87. Robbins Jr., D.H. and Reddy, J.N., "Modeling of Actuators in Laminated Composite Structures," SPIE Vol. 1917 Smart Structures and Intelligent Systems, pp. 485-496, 1993.
 88. Sensor Technology Limited. Available at <http://www.sensortech.ca/>
 89. Shah, D.K., Joshi, S.P. and Chan, W.S., "Structural Response of Plates with Piezoceramic Layers," SPIE Vol. 1917 Smart Structures and Intelligent Systems, pp.428-439, 1993.
 90. Shen, I.Y., "A Study of Active Constrained Layer Damping Treatments on Composite Beams," US Airforce Phillips Lab Internal Report. 1994.
 91. Shibuta, S., Morino, Y., Shibayama, Y. and

- Sekine, K., "Adaptive Control of Space Truss Structures by Piezoelectric Actuator," Proceedings of the Second Joint Japan/U.S. Conference on Adaptive Structures, pp. 245-262, 1991.
92. Singh, D.A. and Vizzini, A.J., "Structural Integrity of Composite Laminates with Interlaced Piezoceramic Actuators," SPIE Vol. 1917 Smart Structures and Intelligent Systems, pp. 473-484, 1993.
93. Sullivan, J.M., Hubbard Jr., J.E. and Burke, S.E., "Distributed Transducer Design for Plates: Spatial Shape and Shading as Design Parameters," SPIE 1994 North American Conference. 1994.
94. Sun, W., "Modeling of Flexible Piezoelectric Laminates," SPIE Vol. 1917 Smart Structures and Intelligent Systems, pp. 497-507, 1993.
95. Tzou, H.S. and Gadre, M., "Active Vibration Isolation by Polymeric Piezoelectric with Variable Feedback Gains," AIAA Journal, Vol 26, pp. 1014-1017, 1988.
96. Tzou, H.S. and Tseng, C.I., "Distributed Piezoelectric Sensor /Actuator Design for Dynamic Measurement /Control of Distributed Parameter Systems: A Piezoelectric Finite Element Approach," Journal of Sound and Vibration, Vol. 138, No. 1, pp. 17-34, 1990.
97. Tzou, H.S., Tseng, C.I. and Wang, G.C., "Distributed Structural Dynamics Control of Flexible Manipulators-II. Distributed Sensor and Active Electromechanical Actuator," Computers & Structures, Vol. 35, No. 6, pp. 679-687, 1990.
98. von Flotow, A.H. and Vos, D.W., "The Virtues of Passive Damping in Controlled Structures,"
99. Wada, B.K., Fanson, J.L. and Crawley, E.F., "Adaptive Structures," Proceedings of the 30th Structural Dynamics Conference, Mobile, AL, pp. 1-8, 1989.
100. Wu, S.Y., "Piezoelectric Shunts with Parallel R-L Circuits for Structural Damping and Vibration Control," Proceedings of the SPIE, Vol. 2720, pp. 259-269, 1996.
101. Wu, S.Y., and Bicos, A.S., "Structural Vibration Damping Experiments Using Improved Piezoelectric Shunts," Proceedings of the SPIE, Vol. 3045, 40-50, 1997.
102. Wu, Z., Bao, X.Q., Varadan, V.K. and Varadan, V.V., "A Study on Control of a Light Weight Robotic System Using Piezoelectric Motor, Sensor and Actuator," Proceedings of the ADPA/AIAA/ASME/SPIE Conference on Active Materials and Adaptive Structures, Institute of Physics Publishing, pp. 97-101, 1991.
103. Yang, S. and Huang, W., "Piezoelectric Constitutive Equations for a Plate Shape Sensor/Actuator," AIAA Journal, Vol. 35, No. 12, pp. 1894-1895, 1997.
104. Yeh, M.K. and Chin, C.Y., "Dynamic Response of Circular Shaft with Piezoelectric Sensor," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 5, pp. 833-840, 1994.
105. K.-J. Yoon, W.-K. Ra and M. K. Kwak, "Active Vibration Control of Hybrid Composite Grid Structure by Piezoceramic Sensors and Actuators," Kore-Russia Joint Seminar on Composite Technology, Daejeon Korea. pp. 101-110, May 26-27 1997,
106. 곽문규, "압전재료를 이용한 지능구조물의 능동진동제어", 한국소음진동학회지, 제5권 제3호, pp. 292-302, 1995.
107. 곽문규, "지능구조물의 능동진동제어를 위한 PPF 제어기와 수정 LQG 제어기의 비교 연구", 한국소음진동공학회지, 제8권, 제6호, pp. 1121-1129, 1998.
108. 곽문규, 남상현, "보의 회전 및 진동제어를 위한 동적 모델 타당성 연구", 한국소음진동공학회지, 제11권 제2호, pp. 292-300, 2001.
109. 곽문규, 라완규, 윤광준, "PPF 와 SRF 혼합 제어기법을 이용한 복합재료 격자 구조물의 능동진동제어", 한국소음진동공학회지, 제7권, 제5호, pp. 811-817, 1997.
110. 곽문규, 신태식, "유전자 알고리즘을 이용한 능동진동제어기의 실시간 조정", 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, 대전, pp. 787-792, 1998.
111. 김 승환, 최 승복, 정 재찬, "압전 필름을

- 이용한 외팔보의 능동 진동 제어," 한국항공우주학회지, 제21권 제5호, pp. 76-87, 1993.
112. 김 종선, "압전소자를 액츄에이터로 이용한 단성 보의 능동 제어," 한국소음진동학회지, 제2권 제3호, pp. 173-180, 1992.
 113. 남상현, 곽문규, "조화진동형태의 외부교란에 대한 능동진동제어기의 설계", 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 207-212, 1999.
 114. 남상현, 곽문규, "능동-수동 조합감쇠를 이용한 지능 구조물의 진동제어 실험", 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, pp. 201-204, 1999.
 115. 남 창호, 황 재혁, 오 승민, "압전재료가 있는 복합재 평판의 진동 제어를 위한 구조/제어 최적 설계," 한국항공우주학회지, 제21권 제4호, pp. 49-59, 1993.
 116. 라완규, 곽문규, 윤광준, "압전감지기와 작동기를 이용한 복합재료 격자 구조물의 능동진동제어", 한국항공우주학회지, 제25권, 제5호, pp. 76-85, 1997.
 117. 라완규, 곽문규, 윤광준, "PPF와 SRF제어기법을 사용한 지능구조물의 능동진동제어", 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, 경주, pp. 400-406, 1997.
 118. 라완규, 곽문규, "자아감지 압전작동기의 실제 구현상의 문제점", 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 357-361, 1999.
 119. 류근호, 한재홍, 이인, "압전감지기/작동기를 이용한 복합재 평판의 최적 진동제어 실험", 한국소음진동공학회지, 제7권, 제1호, pp. 161-168, 1997.
 120. 송철기, "자동차의 평판진동저감을 위한 능동진동제어," 대한기계학회지, 제36권 제7호, pp. 705-712, 1996.
 121. 신태식, 곽문규, "유전자 알고리즘을 이용한 능동진동제어기의 실시간 조정", 한국소음진동공학회지, 제10권 제6호, pp. 1083-1093, 2000.
 122. 신태식, 곽문규, "수정 LQG 제어기를 이용한 지능구조물의 능동진동제어", 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, 용평, pp. 664-669, 1998.
 123. 신태식, 곽문규, "유전자 알고리즘을 이용한 외부교란 상쇄제어기의 실시간 조정", 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, 대전, pp. 793-798, 1998.
 124. 윤 광준, "신경 제어 섬유 강화 복합 재료의 개발 및 응용에 관한 연구," 93 첨단 공학(신소재분야) 연구 보고서, 교육부, 1994.
 125. 윤 광준, 이 영재, 김 현수, "압전세라믹 작동기와 폴리머 센서를 이용한 유리/에폭시 복합 재료 외팔보의 능동 억제," 한국복합재료과학회지, 제7권 1호, pp. 48-56, 1994.
 126. 이인, 한재홍, "압전재료를 이용한 스마트 구조물의 진동제어에 관한 연구동향," 한국항공우주학회지, 제25권, 제3호 pp. 168-176, 1997.
 127. 이창배, 한재홍, 이인, "압전 감지기/작동기를 이용한 복합재 보의 최적 진동제어 실험," 한국항공우주학회지, 제24권, 제5호, pp. 97-107, 1996.
 128. 한상보, 곽문규, 윤신일, "PZT 와 PPF 제어기법을 이용한 다중모드 강제진동의 능동진동제어", 한국소음진동공학회지, 제7권 제6호, pp. 1007-1013, 1997.
 129. 허석, 곽문규, "유전자 알고리즘을 이용한 지능구조물의 PPF 제어기 실시간 다중변수 조정", 한국소음진동공학회지, 제11권 제1호, pp. 147-155, 2001.
 130. 허석, 곽문규, "FFT 알고리즘을 이용한 실시간 적응 PPF 제어기의 개발", 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, 대전, pp. 799-804, 1998.
 131. 허석, 곽문규, "유전자 알고리즘에 의한 다중입출력 PPF 제어기의 실시간 조정", 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 213-218, 1999.
 132. 허석, 곽문규, "다중입출력 능동진동제어를 위한 실시간 유전자 알고리즘 개발", 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, pp. 205-210, 1999.
 133. 황 우석, 박 현철, "유연보 진동 제어를 위한 압전감지기/작동기 설계," 한국항공우주학회지, 제 21권 2호, pp. 26-36, 1993.