

압전재료를 이용한 지능구조물의 능동진동제어

학 문 규

(동국대학교 기계공학과)

1. 머리말

미래의 기계구조물 그 중 우주 구조물과 같이 구조물의 진동이 심각한 문제를 일으킬 수 있는 시스템의 성능향상을 위하여 새로운 기법이 개발되어 설계에 응용되고 있다. 이는 구조물 자체에 감지기(sensor)와 작동기(actuator)를 표면에 부착하거나 구조물의 한 부분으로 삽입하여 진동제어를 하는 개념을 말하는데 제어회로를 자동화하여 구조물이 마치 인공지능을 가지고 상황에 대처할 수 있어 지능구조물(intelligent structure 또는 smart structure)이라고 불린다. 이 경우 진동 감지기/작동기의 선택이 중요한 설계 인자가 되는데 이 글에서는 그 중 압전세라믹을 이용한 구조물의 능동진동제어에 대하여 기술하고자 한다.

감지기나 작동기 또는 모두 장착한 이런 구조물에 대해서는 여러 가지의 용어들이 사용되고 있어 먼저 Wada, Fanson과 Caughey의 논문⁽⁷⁴⁾에서 정리한 용어들을 소개하고자 한다. 감지기와 작동기를 갖춘 구조물에 대하여 사용되는 용어들은 adaptive structures, sensory structures, controlled structures, active structures, intelligent structures, smart structures 등이

주로 사용되고 있다. 먼저 형상 변형 구조물(sensory structures)은 감지기를 부착하고 있어서 구조물의 구조상 결함이나 손상 여부를 청취할 수 있는 구조물인데 이들 두 종류의 혼합된 형태가 제어 구조물(controlled structures)이다. 제어 구조물은 감지기와 작동기를 모두 구비하고 있는 구조물인데 시스템의 상태나 변위를 감지하고 피드백 제어회로를 통하여 제어를 동시에 할 수 있다. 제어 구조물은 일반적으로 구조물과 감지기, 작동기가 확연하게 구분되는 경우에 사용되는 용어이고 이에 반하여 감지기와 작동기가 구조물의 부분 구조물로서 제작되는 경우에는 능동 구조물(active structures)로 불리게 된다. 지능 구조물(intelligent structures, smart structures)은 제어로직이 좀더 향상되어 신경망(neural network) 제어나 퍼지로직(fuzzy logic)과 같은 첨단 제어 기법으로 되어 있어 구조물 자체가 능동적으로 상황 변화에 대처할 수 있는 구조물을 의미한다. 현재 지능구조물의 수준까지도 도달한 구조물은 없으며 능동구조물의 제작 또한 초기 단계를 벗어나지 못하고 있다. 활발한 연구가 진행되고 있는 현재 상황을 고려할 때 수년 내에 지능구조물이 그 모습을 선보일 것으로 기대된다.

구조물의 제어를 위해서는 제어 이론보다 실제로 적용할 수 있는 감지기와 작동기의 개발이 필수적이다. 그래서 여러 가지 재료와 메카니즘에 대한 연구가 자동제어 이론과 병행되어 왔는데 그 결과 많은 종류의 감지기와 작동기의 출현을 보게 되었다. 전통적으로 구조물의 감지 장치로 사용되어 왔던 스트레인게이지(strain gage)나 가속도계(accelerometer) 외에 압전 폴리머(polymeric piezoelecturic polyvinylidene fluoride, PVEF)가 이론적으로만 구현되었던 분포 감지기로서의 역할을 담당하게 되었고 부자나 스피커로 사용되었던 압전세라믹 또한 감지기로 사용될 수 있음을 알게 되었다. 압전폴리머와 압전세라믹은 작동기로도 사용될 수 있는데 특히 압전세라믹은 복합재료의 층(layer)안에 삽입할 수 있어 구조물과 감지기/작동기가 일체로 된 지능구조물의 제작이 가능하게 되었다. 이외에 구조물의 능동제어로 사용되는 재료로는 형상 기억합금(shape memory alloy, nitino), 전자기 유체(electromagnetic fluid), 전자장을 이용한 작동기(magnetostrictive material)가 개발되어 연구가 진행되고 있다. 기계적인 장치로는 proof-mass actuator, reaction wheel 등을 들 수 있는데 모든 것

을 종합할 때 압전세라믹이 간편성과 효율성이 높아 가장 인기 있는 감지기/작동기 재료라고 말할 수 있다.

압전 효과(piezoelectricity)는 100여년전 Jacques Curie와 Pierre 에 의해 수정의 크리스탈에 관한 연구로 부터 발견 되었으며, 이후 압전재료들은 의료, 군사, 가전제품 등 여러 분야에서 이용되어 왔다. 특히 2차 세계대전 전후로 세라믹 계통의 압전소재들이 개발되어 이를 응용한 응용 개발은 더욱 확장되었으며 대표적인 것으로는 가속도센서, 적외선 감지기, 초음파 트랜스듀서, 스피커, 마이크로폰 및 수중 탐지기 센서등이 있다. 압전 재료(piezoelectric material)는 전기에너지를 기계적 에너지로 변환시키면서 작동기의 역할을 할 수도 있고 반대로 기계적 변형을 전기적 신호로 바꿀 수 있는 감지기의 기능도 가지고 있는 소재이다. 그래서 압전재료는 전기-기계적인 성질을 갖는 재료라 일반적으로 전기와 기계가 연성된 성질(electro-mechanical property)을 갖게 되며 운동 방정식을 유도할 때 전기적인 항이 추가된다. 압전 폴리머는 압전세라믹에 대하여 작동기로서의 힘 발생력이 떨어지고 온도에 민감하다는 단점으로 인하여 그 사용이 제한적이기는 하나 구조물이 갖고 있는 개개의 진동 모드를 개별적으로 감지할 수 있고 또한 개개의 진동 모드를 선별하여 제어할 수 있는 분포 감지기/작동기의 제작을 가능케 한다는 점에서 각광을 받고 있다. 이에 비해 압전 세라믹은 신호소음비(signal to noise ratio)가 좋아 감지기로서의 감도가 좋고 온도 변화에도 덜 민감하여 압전폴리머에 비해 힘 발생도 크다. 그러나 세라믹 자체가 잘 부서질 수 있고 또한 과도한 하중

이 구조물에 걸렸을 경우 작동기나 감지기 자체가 파손될 수 있다는 가능성이 있어 압전세라믹의 부착시 특별한 주의가 요구된다. 형상 기억 합금은 응답 속도가 늦고 본래의 모습으로 빠른시간 내에 돌아오기 위해서는 냉각을 할 필요가 있다. 이런 점만 극복된다면 힘이 커 작동기로서의 역할이 증대될 것으로 보인다. 그러나 구조물의 형상 변형을 위한 작동기로서는 현재에도 각광을 받고 있다. 이런 재료들의 단점들을 보완할 수 있는 새로운 재료의 개발은 앞으로도 계속될 전망이다. 재료학분야나 물리, 화학 분야와 연계하여 연구 활동을 지속하여야 될 것으로 보인다.

본 글은 필자가 흥미를 갖고 연구에 임했던 진동제어 중 특히 압전세라믹을 이용한 진동 억제 방법에 관한 연구들의 고찰인데 수많은 논문들이 발표된 관계로 참고문헌 중에 누락된 논문들이 있을 것이다. 이는 고의적인 것이 아니고 조사 시간상의 제약으로 인한 것임을 여기에 밝혀 둔다. 아울러 본 글을 토대로 압전재료를 이용한 능동 진동제어에 관해서 많은 연구가 국내에서도 이루어지기를 바란다.

2. 압전감지기/작동기에 대한 연구 동향

앞에서 소개했듯이 압전효과란 압전소자에 압력이 가해졌을 경우 압전소자에 전하(charge)가 발생하여 기계적 변형을 일으키는 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, 부자 등 작동기로서의 예를 들 수 있다.

이와 같이 기계적 변형과 연결되어 있어서 그 동안 재료 역학분야에서 사용되어 온 용어와는 다른 용어들이 전기 분야에서 사용되고 있는데 전기 분야에서조차도 용어가 통일되지 않아 IEEE⁽⁴¹⁾에서 이를 통일한 보고서를 제작하게 된다. 압전 세라믹의 재료 성질에 대하여는 Jaffe의 책⁽⁴³⁾에서 자세하게 다루고 있으나 진동 감지와 제어를 목적으로 하는 연구자들을 대상으로 쓰여진 책이 아니어서 이해하기가 곤란할 것으로 보인다. 압전재료에 관한 용어 설명은 IEEE 보고서⁽⁴¹⁾를 참조하기 바란다. 압전재료의 능동댐핑으로의 적용에 관한 종합적인 보고서로는 Bronowicki, Betros와 Hagwood의 노트⁽¹²⁾가 있는데 이 보고서는 압전세라믹을 이용한 능동댐핑에 관하여 이론적인 배경과 간략화 방법, 실제적인 제어 기법등을 포함하고 있어 압전재료를 이용한 능동진동제어에 관한 연구를 시작하려는 사람들에게 참고서로서 활용될 수 있을 것이다.

압전재료의 모델을 변분법을 사용하여 구할 수 있음을 Nisse⁽⁵⁸⁾가 보여 주었는데 구조물과의 연성효과가 아닌 전기재료와 탄성재료가 결합된 압전재료 그 자체의 진동 해석을 위한 연구 결과이다. 이를 바탕으로 Holland⁽⁴⁰⁾는 변분법을 다시 사용하여 압전세라믹 재료의 공진 특성에 관한 결과를 발표하였는데 그는 이론적인 결과가 실험결과와 잘 일치함을 보여주었다. 변분법의 사용은 유한요소법의 개발을 유도하게 되는데 Allik과 Hughes⁽³⁾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 해

석할 수 있는 방법을 McDearmon⁽⁵⁴⁾이 제시하였다.

압전재료가 구조물과 결합된 시스템에 대한 해석은 간단한 보의 해석으로부터 출발하는데 Crawley와 de Luis의 논문⁽²²⁾은 압전작동기에 대한 초기 논문들 중의 하나이다. 이 논문에서 그들은 압전재료와 탄성 구조물간의 연성을 묘사하는 두 개의 일차원 정적 모델을 제시하였다. 첫 번째 모델은 압전재료가 완벽하게 구조물에 정착되어 있다고 가정하였고 두 번째 모델은 압전재료와 구조물 사이에 두께를 갖는 접착제가 존재한다고 가정하여 그 영향을 조사하였고 이론적인 동적 모델과 실험적인 결과를 제시하고 있다. 초기의 연구로는 또한 Hangud, Obal와 Calise⁽³⁹⁾의 논문이 있는데 그들은 외팔보에 압전 작동기와 감지기를 부착한 시스템을 고려하여 유한요소법을 사용 모델화하여 유한자유도계의 운동방정식을 유도하였다. Crawley와 Anderson⁽²³⁾은 1차원 압전재료와 보 구조물이 결합되어 있는 경우에 대하여 모델화하는 기법을 토의하였고 실험을 통하여 이론 값과 비교하였다. Tzou와 Tseng⁽⁷¹⁾, Tzou, Tseng와 Wang⁽⁷²⁾은 압전재료의 분포성을 고려한 유한요소방법을 개발하여 압전감지기와 작동기가 결합된 평판에 대한 동적 특성을 조사하였다. Hagwood, Chung과 von Flotow⁽³⁷⁾는 구조물과 압전재료 그리고 electronics가 결합된 시스템인 electromechanical 시스템에 관한 운동방정식을 유도하는데 있어 좀더 일반화된 접근 방법을 제시하였다. Bronowicki⁽¹¹⁾는 압전재료와 구조물이 결합되어 있는 경우에 관한 이론을 정리 발표하였다. Banks와 Smith⁽⁸⁾는 압전세라믹 조각이 셀, 평판, 보 등에 정착되어 있을 경우

에 대한 모델화기법을 다루었고 Lazarus와 Crawley⁽⁴⁷⁾는 판 모양의 구조물이 압전 작동기와 감지기와 결합된 경우에 대하여 Rayleigh-Ritz 기법을 사용하여 모델을 구하였다. Shah, Joshi와 Chan⁽⁶⁴⁾, Mitchell과 Reddy⁽⁵⁷⁾, Chandrashekhara과 Agarwal⁽¹⁹⁾, Birman⁽¹⁰⁾, Singh과 Vizzini⁽⁶⁷⁾, Robbins과 Reddy⁽⁶⁴⁾, Sun⁽⁶⁹⁾은 유한요소법을 사용하여 복합재료판의 일부층에 압전세라믹판이 삽입되었을 경우의 모델화에 관한 논문들을 발표하였다. Park, Walz와 Chandra⁽⁶⁰⁾은 보의 굽힘과 비틀림이 연성된 경우에 압전작동기의 영향을 조사하였고 Yeh와 Chin⁽⁷⁶⁾는 축에 비틀림 진동을 감지할 수 있는 압전감지기를 부착하였을 경우 축의 동적 특성이 어떻게 변화하는지를 조사하고 실험을 수행하여 이론적 결과와 비교하였다. Lin과 Abatan⁽⁵³⁾은 압전재료를 감지기 또는 작동기로 사용했을 경우에 현재 시장에 나와 있는 유한요소 프로그램들을 어떻게 사용하는가에 대하여 토의 하였다. Agrawal과 Tong⁽¹⁾은 평판에 압전 작동기를 삽입하였을 경우에 대한 모델화 방법에 대한 이론적 연구결과를 발표하였다. Miccoli, Concilio와 Lecce⁽⁵⁶⁾는 압전세라믹을 이용한 구조물의 진동 제어에 있어 유한요소법과 신경망을 이용한 모델링기법에 대하여 소개하였다.

국내에서도 압전재료가 포함된 구조물에 관한 연구가 시작되어 남창호, 황재혁, 오승민⁽⁷⁹⁾은 압전재료를 복합재 평판 내층에 부착한 경우를 고려하여 항공기 날개로의 적용을 다루었고 운동방정식의 유도를 위하여 Rayleigh-Ritz 방법을 사용하였다.

일찍이 Forward⁽³⁰⁾, Forward와 Swiger⁽³¹⁾는 광학 구조물의 한 종

류인 membrane 형태의 구조물에 압전재료를 이용하여 간단한 진동 제어 실험을 함으로써 댐핑을 증가시킬 수 있음을 증명하였다. 이후의 제어기법에 관한 연구는 다양하게 전개되어 여러 가지 실험적인 연구결과들을 보게된다. Hanagud, Obal과 Calise⁽³⁹⁾은 능동제어기법으로서 rate feedback, modal feedback, optimal output feedback 제어 기법을 사용하였다. Fanson과 Caughey⁽²⁸⁾는 구조물의 진동을 제어하는 기법으로서 일반화된 변위 신호를 positive feedback 하는 기법인 positive position feedback (PPF) 제어기법을 소개하였고 압전재료를 붙인 외팔보를 사용하여 실험적으로 PPF 제어기법의 타당성을 증명하였다. 1자유도계에 관한 이론을 확장하여 Poh와 Baz⁽⁶¹⁾는 트러스 구조물의 진동을 억제하기 위하여 압전세라믹 작동기를 쌓아올린 형태의 작동기를 사용하고 제어기법으로는 independent modal space control(IMSC) 개념에 입각하여 각 모드를 제어하는 modal positive position feedback 제어 기법의 사용을 사용하였다. Tzou와 Gadre⁽⁷⁰⁾는 압전폴리머를 이용한 진동 억제에 있어서 위상각과 게인을 변화시키는 제어 기법을 사용하였다. Burke와 Hubbard⁽¹⁶⁾는 Lyapunov의 직접법을 사용하여 여러 형태의 경계 조건을 갖는 보들에 대한 제어방법들을 유도하고 설계 지침을 제시하였다. Hagwood, Chung과 von Flotow⁽³⁷⁾는 분로회로(shunted circuit)를 사용하여 수동댐핑(passive damping)을 얻는 방법을 사용하고 실험을 통하여 이론적 결과를 증명하였다. 이런 간단한 전기회로를 통한 수동댐핑의 구현은 그 뒤에도 이어져 Hagwood와 von Flotow⁽³⁸⁾, Aldrich, Hagwood, von Flotow와

Vos⁽²⁾, Edberg, Bicos와 Fechter⁽²⁷⁾가 어떻게 수동댐핑을 구현하는가를 보여주었다. Babu와 Hanagud⁽⁵⁾는 압전감지기/작동기를 포함하는 구조물의 진동제어를 위하여 μ synthesis 기법을 이용 Robust 제어기를 설계하였다. Garcia, Dosch와 Inman⁽³³⁾, Dosch, Inman과 Garcia⁽²⁶⁾, Inman과 Garcia⁽⁴²⁾는 자체 감지 가능 작동기(self-sensing actuator)의 설계에 관해 논하면서 PPF 제어 설계와의 연계에 관한 논문을 발표하였다. Lazarus과 Crawley⁽⁴⁷⁾는 linear quadratic Gaussian(LQG) 제어와 optimal projection compensator를 사용한 실험 결과를 제시하고 있다. Li, Beigi, Li와 Liang⁽⁵²⁾은 diamond turning lathe의 위치 제어에 있어 압전 작동기를 사용하고 제어 기법으로는 learning self-turning regulator를 사용하여 파라미터를 추적하는 방법을 제시하였다. Garcia와 Inman^(34,35)은 탄성체를 회전시키는 경우에 압전감지기/작동기를 사용하여 진동을 억제하는 방법을 소개했으며, 회전탄성체의 진동제어에 관한 논문으로는 Khorrami, Zeinoun⁽⁴⁴⁾가 flexible multibody의 slewing 문제를 다루면서 진동 제어를 위하여 decentralized frequency shaping과 self-turning adaptive 제어 기법을 사용하여 회전시 진동을 억제하는 방법에 대한 연구 결과가 있고 Pota, Alberts와 Peterson⁽⁶²⁾의 H^∞ 제어 기법을 이용한 연구결과 그리고 Denoyer와 Kwak⁽²⁵⁾, Kwak, Denoyerdhk Sciulli⁽⁴⁵⁾의 외팔보가 회전하는 경우에 대한 multi-input multi-output(MIMO) PPF와 MIMO LQG 제어 기법의 적용이 있다. Impedance matching 제어 기법에 관한 연구도 활발히 진행되어 Fanson, Lurie, O'Brien과 Chu

⁽²⁹⁾가 system identification 기법과 impedance matching 기법에 대하여 논하였고 Betros, Alvarez-Salazar와 Bronowicki⁽⁹⁾는 impedance matching 제어 기법이 압전재료를 사용한 진동 제어 기법으로 사용될 수 있음을 보였다. Paige, Scott, Weissshaa⁽⁵⁹⁾는 압전 재료를 복합재료판에 붙여 flutter를 제어하는 방법을 소개하였는데 제어 기법으로는 LQR(linear quadratic regulator)이 사용되었다.

제어 설계에 관한 국내의 연구 결과로는 황우석과 박현철⁽⁸²⁾이 압전감지기/작동기가 결합된 유연보의 진동제어 문제를 다루면서 관측성, 제어성, 안정성등 제어 성능면에서의 조건을 다루었고 제어 성능을 높일 수 있는 제어 설계 방법을 제시하였다. 김종선⁽⁷⁸⁾은 경계 제어(boundary control)를 사용하는 진동제어방법을 제시하고 spillover의 영향과 감지기의 최적 위치 결정 방법을 토의 하였으며 실험 결과를 제시하고 있다. 남창호, 황재혁과 오승민⁽⁷⁹⁾은 LQR을 적용하였고 진동제어성능을 극대화하기 위한 최적화 기법을 사용하여 최적의 설계 파라미터를 결정할 수 있음을 보였다. 김승한, 최승복과 정재천⁽⁷⁷⁾은 압전필름을 이용한 외팔보의 능동진동제어를 bang-bang 제어 방법들을 사용하여 행하였다. 윤광준⁽⁸⁰⁾과 윤광준, 이영재와 김현수⁽⁸¹⁾는 압전세라믹 작동기와 폴리머 감지기를 부착한 복합 재료 외팔보의 능동진동억제를 다루었는데 제어방법으로는 PD(proportional plus derivative)가 사용하였다.

진동제어를 위하여 압전재료를 도입한 개념하에 쓰여진 초기논문들 중의 하나가 Bailey와 Hubbard의 논문⁽⁶⁾인데 그들은 금속 외팔보 윗면 전체에 압전폴리머를 접착

시켜 작동기로써의 역할이 가능함을 보였다. Bailey와 Hubbard⁽⁶⁾는 압전폴리머를 외팔보에 특수한 형태로 분포시켜 진동제어를 하는 spatial filter의 개념을 도입하였는데 이 개념을 더욱더 확장시켜 Burke와 Hubbard⁽¹⁵⁾가 다시 압전폴리머를 이용한 진동제어에 있어서 길이에 따라 형상이 바뀌는 제어기를 사용하는 방법에 대한 논문을 발표하였다. 또한 Lee와 Moon⁽⁴⁹⁾는 복합재 표면의 굽힘과 비틀림 진동제어를 위한 감지기와 작동기의 설계에 관하여 Burke와 Hubbard^(17,18)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 압전세라믹의 특성을 이용한 방법이라고 말할 수 있다. 같은 개념 하에 Lee, Chiang, O'Sullivan^(48,50,51)도 압전폴리머를 이용하여 각각의 모드를 감지하고 각각의 모드를 제어할 수 있는 modal sensor/actuator의 설계에 관하여 연구하고 간단한 속도 feedback으로 임계댐핑을 얻을 수 있음을 보여주었다. Sullivan, Hubbard, Burke⁽⁶⁸⁾는 직사각형 단순 지지 평판의 진동제어를 위한 분포 감지기와 작동기의 최적 설계에 관한 논문을 발표하였다.

de Luis와 Crawley⁽²⁴⁾는 우주 구조물의 진동제어를 실현하기 위하여 표면에 부착된 압전재료를 갖는 알루미늄보, 압전세라믹이 삽입된 복합재료들에 대하여 압전 작동기가 전체 구조물에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였고 von Flotow와 Vos⁽⁷³⁾는 능동 제어가 부착된 시스템에 대하여 수동댐핑

이 미치는 영향에 대하여 논하였다. Edberg, Bicos와 Fechter⁽²⁷⁾는 압전재료를 이용하여 active-damping strut를 제작하였고 Fanson, Lurie, O'Brien과 Chu⁽²⁸⁾는 JPL의 트러스 구조물에 압전재료로 만들어진 작동기 멤버를 삽입하여 진동 제어를 실험하였으며 Poh와 Baz⁽⁶¹⁾는 압전 세라믹을 쌓아올린 형태의 작동기를 사용하여 트러스 구조물의 진동을 억제하였는데 Shibuta, Morino, Shibayama와 Sekine⁽⁶⁶⁾, Fujita, Tagawa, Murai, Shibuya, Takeshita와 Takahashi⁽³²⁾는 압전재료를 이용하여 트러스 멤버를 능동작동기로 만드는 방법을 소개하였다. Lee, Chiang과 O'Sullivan⁽⁵¹⁾은 전류앰프(current amplifier)를 이용 변형률을 감지할 수 있는 감지기의 설계에 대한 논문을 발표하였다. Collins, Padilla, Notestine와 von Flotow⁽²⁰⁾는 압전필름 감지기의 제작에 관해 다루었으며 모달 감지기를 flexible multibody에 적용하여 실험 결과를 발표하였다. Bronowicki 등^(11, 13, 14)은 위성체의 mast로 사용하기 위하여 복합재료 구조물에 압전 세라믹을 삽입시킨 형태의 구조물을 제작하였고 능동제어 기법을 적용하여 진동제어 실험을 행하였다. Anderson, Moore, Fanson과 Ealey⁽⁴⁾은 압전재료와 electrostrictive 작동기를 이용한 능동 멤버의 제작에 대하여 논하였다. Griffin과 Denoyer⁽³⁶⁾는 압전세라믹 작동기에 성공적으로 사용되어 온 PPF 제어회로를 소형화하는 방법을 발표하였다. 그 외 특이할 만한 논문으로는 수동댐핑과 능동댐핑을 결합시켜 능동 제어가 파손되었을 때에도 어느 정도 댐핑을 보장할 수 있는 시스템의 설계에 관한 Shen⁽⁶⁵⁾의 보고서가 있다. 이렇게 수동댐핑과

능동댐핑이 결합된 시스템을 active constrained layer damping 이라고 부르는데 앞으로 좀더 많은 연구가 필요할 것으로 보인다. 압전재료의 특성을 활용한 압전 모터의 개발도 연구가 활발히 진행되고 있는데 로봇의 관절운동에 압전 모터를 사용한 연구 결과가 Wu, Bao, Varadan⁽⁷⁵⁾에 의해 발표되었다. 소음진동제어에 관한 논문으로는 Banks, Fang, Silcox와 Smith⁽⁷⁾의 연구결과가 있다.

3. 압전재료의 모델화

압전재료에 가해지는 전압과 수직응력에 의하여 발생하는 변형도와 전하 밀도의 관계는 다음과 같이 연성된 식으로 표현된다⁽⁴¹⁾.

$$\begin{bmatrix} D \\ E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^T & d \\ d' & s^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S \\ T \end{bmatrix}$$

여기서 D 는 전기 변위(electrical displacement, charge/area), E 는 전기장(electrical field), S 는 변형률 그리고 T 는 응력을 각각 나타낸다. 실제 구조물과의 연성은 d 성분에 의해 결정이 되며 이와 같이 전기-기계 재료가 구조물과 합쳐졌을 경우 운동방정식과 감지 방정식은 다음과 같이 일반식으로 쓰여질 수 있다⁽²⁵⁾.

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

여기서 M 과 K 는 각각 질량행렬, 강성행렬을 가리키며 압전감지기와 작동기에 의한 질량의 증가와 강성의 증가가 포함되어 있다. q 는 진동을 나타내는 일반 변위이며, B_a 는 개개의 압전작동기가 일반변위에 미치는 영향을 나타내는 영향행렬이고, G_a 는 각각의 압전작동기에 대한 고출력앰프(power

amp)의 계인에 해당한다. v_s 는 감지기의 전압 출력을 가리키며 G_s 는 감지기의 계인 그리고 C_s 는 압전감지기의 감도를 나타낸다. B_s 는 감지기의 영향 행렬을 나타내는데 만일 감지기가 작동기가 같은 영역을 차지하고 있다면 $B_s = B_a$ 가 된다. 이 경우에 완벽한 collocated 제어가 성립하게 되어 이론적으로 볼때 아주 바람직스러운 경우가 되나 실제 적용에서는 제한 조건이 많아 이를 구현하기가 어렵다. 압전감지기의 전앰프(pre-amp)로는 전하앰프(charge amp)가 사용되기 때문에 감지기 방정식은 일반 변위에 비례하는 것으로 나타난다. 만일 전류앰프를 사용한다면 감지기의 출력은 일반 속도에 비례하게 된다. Kwak과 Sciulli⁽⁴⁶⁾는 이들을 두 그룹의 센서와 앰프들을 사용하여 일반 변위와 속도를 측정하였고 이를 바탕으로 퍼지로지 제어를 구현하였다.

앞에서 구한 운동방정식은 고유치문제의 해를 사용하여 한번 더 변환을 하게 되는데 그렇게 하면 다음과 같은 식으로 귀결된다.

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

여기서 $U^T M U = I$, $U^T K U = \Lambda$ 를 사용하였으며 I 는 단위 행렬을 나타내며 Λ 는 고유치가 대각선으로 배열된 행렬을 나타낸다.

제어를 위해서는 2차의 연립 미분방정식보다는 상태방정식 형태(state form)의 표현식을 취하는 것이 좋은데 이를 위하여 새로운 상태벡터, $x = [z^T \dot{z}^T]^T$ 를 도입하면 다음과 같은 상태방정식을 쓸 수 있다⁽⁶⁵⁾.

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

여기서 계수 행렬들은 위 식과 비

교하여 쉽게 그 형태를 구할 수 있다. 이와 같이 무한자유도를 갖는 연속계를 유한자유도를 갖는 이산계로 치환하기 위해서는 변분법을 이용한 Rayleigh-Rita 방법이나 유한요소법을 사용할 수 있다. 그러나 실제 제어를 설계할 경우 감지기와 작동기의 숫자가 제한되어 있어서 제어를 하고자 하는 고유 모드의 숫자를 제한할 필요가 있다. 이럴 경우 고차의 진동 모드에 원하지 않은 영향이 미치게 되어 일반적으로 말하는 control spillover 문제가 발생하게 된다. 이와 마찬가지로 이유로 감지기에도 spillover 문제가 발생하게 되나 일반적으로 고차에서는 구조물 자체에 내재하는 자연댐핑의 영향으로 그 영향이 미미해진다. Denoyer와 Kwak⁽²⁵⁾의 논문에서 압전세라믹 감지기와 작동기가 접착된 외팔보의 동적 모델을 다루었는데 이론적인 주파수 응답함수(frequency response function)이 실험으로부터 얻은 주파수 응답과 잘 일치함을 보여주었다.

4. 지능 구조물에 사용되는 능동제어기법

앞장에서 얻어진 지능 구조물의 실제적인 제어를 위해서는 제어가 되도록 단순할수록 좋고 설치가 쉬우며 시스템의 변화에 대처할 수 있는 robustness가 보장되어야 하는 조건들을 만족시켜야 한다. 앞에서 보았듯이 많은 종류의 제어 기법들이 지능 구조물에 성공적으로 적용되었고 실험으로도 진동 제어가 보장됨을 보았다. 실제 응용면에서 가장 성공적인 진동 제어 방법들 중 PPF 제어(positive position feedback)^(28,12)와 SRF 제어(strain rate feedback)⁽¹²⁾에 대해 자세히 다루어 보기로 한다.

PPF 제어는 일반 변위를 계속

하여 진동을 억제하는 방법인데 몇 가지 바람직한 장점들을 지니고 있다. 먼저 댐핑을 증가시키고자 하는 주파수 영역을 확실하게 제어할 수 있고 고유 진동 모드들이 밀집되어 있더라도 개개의 고유 모드들을 독립적으로 제어할 수 있다. 또한 설치가 간단하며 spillover에 덜 민감하고 작동기의 동적 거동에 의해 불안정해지지 않는다. 또한 일반 변위를 사용하기 때문에 변형률을 계속하는 경우에 합당하다. 이 제어 기법을 자세히 설명하기 위해서는 1자유도의 진동계를 나타내는 2차 미분방정식을 예로 들어 설명하면 쉽게 그 원리를 이해할 수 있다. 먼저

$$\ddot{\eta} + 2\zeta\omega \dot{\eta} + \omega^2\eta = g\omega^2\xi$$

는 1자유도 스프링-질량-댐퍼계의 운동 방정식을 나타내며 여기서 η 는 구조물의 모달좌표계를 나타내고 ζ 와 ω 는 구조물의 댐핑계수와 고유 진동수를 나타낸다. g 는 계인을 나타내며 ξ 는 필터의 거동을 나타내는 좌표 계이다. PPF 제어 보상회로식으로 구조물의 운동방정식과 비슷한 형태로 주어진다.

$$\ddot{\xi} + 2\zeta_r\omega_r\dot{\xi} + \omega_r^2\xi = \omega^2\eta$$

여기서 ζ_r 와 ω_r 는 필터의 댐핑계수와 고유진동수를 나타낸다. 이 보상회로를 Laplace 변환을 사용하여 나타내면 다음과 같이 되는데

$$H(s) = \frac{\omega_r^2}{s^2 + 2\zeta_r\omega_r s + \omega_r^2}$$

이식은 결국 저주파 통과 필터(low-pass filter)와 같은 형태로 됨을 알 수 있다. PPF 회로는 Op Amp를 사용하여 간단하게 회로를 구성할 수 있다⁽¹²⁾. Root-Locus에서 볼 수 있듯이 이 회로는 개루프 pole를 허수축에서 멀리 이동시키는 역할을 한다. 그러나 계인이 너무 커지면 불안정계가 될 수 있어

계인을 결정하는데 있어 주의하여야 한다. PPF의 적용은 $\omega_r = \omega$ 로 만들어 가장 심각한 진동을 유발하는 고유 진동 모드를 개별로 제어하게 된다. 실제 구조물에서는 물론 무한개의 pole과 zero들이 있는데 고유 모뒰들간의 연성이 약하고 pole과 zero간에 충분한 주파수 간격이 존재할 시에는 구조물의 특정 고유 모드를 다른 모드들에는 영향을 주지 않으면서 제어할 수 있다. 여러 개의 모드를 제어하고자 한다면 개개의 모드를 제어할 수 있는 PPF 제어기를 설치하여 decentralized control 개념 하에 몇 개의 모드를 제어할 수도 있고 아니면 Pseudo-Inverse에 근거 실제 적용되는 힘을 산출할 수도 있다⁽²⁵⁾.

SRF 제어는 앞에 보이는 보상회로의 입력으로 일반 좌표 계의 속도를 입력시키는 것이어서 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$\dot{\xi} + 2\zeta_r\omega_r\dot{\xi} + \omega_r^2\xi = \omega^2\dot{\eta}$$

Laplace변환을 취하면 다음과 같이 되는데

$$H(s) = \frac{s\omega_r^2}{s^2 + 2\zeta_r\omega_r s + \omega_r^2}$$

이상과 같은 전달 함수는 결국 띠주파수 통과 필터(band-pass filter) 형태가 되면 cut-off 주파수의 안쪽이나 바깥쪽중 선택하여 제어를 할 수 있다. PPF 제어와는 달리 넓은 주파수 영역에 걸쳐 제어를 할 수 있기 때문에 여러 모드를 한 번에 제어할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 제어가 되는 주파수 영역의 반대편에는 음댐핑(negative damping)이 적용되는 관계로 불안정해질 수 있어 세심한 주의를 요한다. SRF 제어도 설치가 간편한 관계로 많이 사용되고 있다⁽¹²⁾.

이외에 아날로그회로를 이용한 제어기법으로는 현재 활발히 연구가 진행되고 있는 impedance matching 제어기법이 있다.⁽¹²⁾

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 변화등 아날로그 제어에서 볼 수 없었던 현상들이 나타나게 된다. 그리고 A/D, D/A의 sampling speed는 제한이 있어 많은 수의 진동 모드를 제어하는데 어려움이 있다. 최근 DSP chip의 개발로 제어 주기가 짧아지고 있으므로 좀더 많은 수의 진동이 요구되는 회로라 데이터 처리를 빨리 할 수 있는 전용 컴퓨터의 개발이 필요하다.

5. 맺 음 말

개략적이거나 압전재료를 이용한 능동진동제어에 관한 연구동향과 연구결과를 살펴보았다. 능동 진동제어에 사용되고 있는 감지기/작동기들 중 압전세라믹은 몇 가지 장점을 지니고 있어 그 적용에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있는 현실이며 실제 구조물로써의 적용이 이루어지고 있다. 압전세라믹을 이용한 진동제어는 박판으로 이루어진 국부구조물의 진동제어에 적합하며 그래서 자동차의 진동소음제어, 위성체 태양판의 진동제어에 사용할 수 있고 또한 겹쳐놓은 형태의 압전세라믹은 트러스 구조물의 능동 멤버로 활용할 수 있다. 이렇게 겹쳐놓은 형태의 압전세라믹 구조는 진동 고립(vibration isolation)을

원하는 장비의 지지대로 사용할 수 있어 그 응용분야가 넓다.

최근까지도 압전세라믹을 이용한 진동제어는 주로 외팔보, 또는 평판과 같은 단순한 기하학적 형상을 가진 구조물에 국한되어 연구가 진행되어 왔고 제어기법 또한 그동안 전기제어분야에서 개발되어 온 기법들을 적용하는 현상을 보였는데 구조물의 자유도가 무한대인 점을 고려할 때 앞으로 구조물에 합당한 제어 기법의 개발이 요망된다고 하겠다. 이 논문에서 선보인 PPF와 SRF 제어 기법은 필자가 간단히 회로를 구성하여 실험을 수행하였는데 압전재료의 진동제어 기법으로 단순하면서도 효율적인 제어기법이라고 말할 수 있다. 압전재료를 이용한 진동제어에 관한 국내의 연구 활동이 미미한 상태이므로 이 분야에 대한 연구자들의 관심을 모을 필요가 있다.

압전세라믹 감지기와 작동기의 설치는 그동안 압전세라믹 판을 직접 구조물에 접착시킨 형태로 진행되었는데 새로운 형태의 압전세라믹 작동기의 개발이 시급하다. 이는 높은 전압을 필요로 하는 진동제어는 필수적으로 커다란 부대 시설을 요구하게 됨으로 전압을 높이지 않고도 진동제어를 효율적으로 할 수 있는 압전세라믹의 제조가 필요하다고 하겠다. 필자는 이런 목적으로 다층 압전세라믹(multi-layer piezoceramic plate)을 제작한 적이 있었는데 실험결과는 신통치 않았다. 또한 압전세라믹을 길고 얇은 조각으로 잘라 사용하는 방법도 있었으나 세라믹의 절단시 다이아몬드 컷터를 사용해야 되어 제작이 곤란했다. 또한 압전세라믹이 부서지기 쉬운점을 개선한다면 진동제어에 있어 아주 효과적인 감지기/작동기가 될 수 있을 것이다. 압전세라믹의 진동제어로의 응용

은 진동을 전공하는 사람들에게 전 기회로 지식을 기본으로 갖추어야만 되는 부담을 가져왔다. 기전 공학으로도 불리는 메카트로닉스분야에 속하는 이 분야의 활발한 연구 활동을 위해서는 타분야 즉 전기 제어 분야와 재료 전문 분야의 전문가들과 손잡고 일을 진행해야 될 것으로 보인다.

끝으로 압전재료를 사용한 능동 제어에 관하여 국내에서 수행된 연구결과들에 대하여 시간상 충분한 조사가 이루어지지 않았음을 밝혀 둔다.

참 고 문 헌

- (1) Agrawal, S.K. and Tong, D., 1994, "Modeling and Shape Control of Piezoelectric Actuator Embedded Elastic Plates," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 5, pp. 514~521.
- (2) Aldrich, J., Hagood, N.W., Von Flotow, A. and Vos, D.W., 1993, "Design of Passive Piezoelecturic Damping foir Space Sturctures," SPIE Vol. 1917, Smart Structures and Intelligent Systems, pp. 692~705.
- (3) Allik, H. and Hughes, J.R., 1970, "Finite Element Method for Piezoelectric Vibration," International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 2, pp. 151~157.
- (4) Anderson, E.H., Moore, D.M., Fanson, J.L., Ealey, M.A., "Development of an Active Member Using Piezoelecturic and Electrostrictive Actuation for Control of Precision Structures,"
- (5) Babu, G.L.N. and Hanagud, S., 1991, "Robustness and Vibra-

- tion Control of Adaptive Structures by the Use of Piezoelectric Sensors and Actuators," AIAA-91-1236-CP, pp. 2269~2279.
- (6) Bailey, T. and Hubbard Jr., J. E., 1985, "Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 8, No. 5, pp. 605~611.
- (7) Banks, H.T., Fang, W., Silcox, R.J. and Smith, R.C., 1992, "Approximation Methods for Control of Acoustic/Structure Models with Piezoceramic Actuators," NASA Contractor Report, AD-A244 350, pp. 1~28.
- (8) Banks, H.T. and Smith, R.C., 1993, "The Modeling of Piezoceramic Patch Interactions with Shells, Plates and Beams," NASA Contractor Report, pp. 1~31.
- (9) Betros, R.S., Alvarez-Salazar, O.S. and Bronowicki, A.J., 1993, "Experiences with Active Damping and Impedance Matching Compensators," SPIE Vol. 1917, Smart Structures and Intelligent Systems, pp. 856~869.
- (10) Birman, V., 1993, "Theory of Sandwich Plates with Piezoelectric Reinforcements," SPIE Vol. 1917, Smart Structures and Intelligent Systems, pp. 461~472.
- (11) Bronowicki, A.J., 1992, "Advanced Composites with Embedded Sensors & Actuators(ACESA)," US Airforce Phillips Lab Internal Report.
- (12) 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.
- (13) Bronowicki, A.J., Betros, R. S., Dvorsky, G.R., Wyse, R.E., Innis, J.W. and Kuritz, S.P., 1993, "Advanced Composites with Embedded Sensors and Actuators," PL-TR-93-3017.
- (14) Bronowicki, A.J., Innis, J.W., Betros, R.S. and Kuritz, S.P., 1993, "ACESA Active Member Damping Performance," SPIE Vol. 1917, Smart Structures and Intelligent Systems, pp. 836~847.
- (15) Burke, S.E. and Hubbard Jr., J.E., 1987, "Active Vibration Control of a Simply Supported Beam Using a Spatially Distributed Actuator," *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 25~30.
- (16) Burke, S.E. and Hubbard Jr., J.E., 1988, "Distributed Actuator Control Design for Flexible Beams," *International Federation of Automatic Control*, Vol. 24, No. 5, pp. 619~627.
- (17) Burke, S.E. and Hubbard Jr., J.E., 1990, "Spatial Filtering Concepts in Distributed Parameter Control," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 112, pp. 565~573.
- (18) Burke, S.E. and Hubbard Jr., J.E., 1991, "Distributed Transducer Vibration Control of Thin Plates," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 90, No. 2, pp. 937~944.
- (19) Chandrashekhara, K. and Agarwal, A.N., 1993, "Dynamic Modeling of Piezoelectric Laminated Plates Using Finite Element Method," SPIE Vol. 1917, Smart Structures and Intelligent Systems, pp. 451~460.
- (20) Collins, S.A., Padilla, C.E., Notestine, R.J. and Von Flotow, A.H., 1992, "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.
- (21) Crawley, E.F. and de Luis, J., 1986, "Experimental Verification of Distributed Piezoelectric Actuators for Use in Precision Space Structures," *Proceedings of the 27th SDM Conference*.
- (22) 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.
- (23) Crawley, E.F. and Anderson, E.H., 1990, "Detailed Models of Piezoceramic Actuation of Beams," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 1, No. 1, pp. 4~25.
- (24) de Luis, J. and Crawley, E.F., 1990, "Experimental Results of Active Control on a Prototype Intelligent Structure," AIAA-90-1163-CP, pp. 2340~2350.
- (25) Denoyer, K.K. and Kwak, M. K., "Dynamic Modelling and Vibration Suppression of a Slewing Active Structure Utilizing Piezoelectric Sensors and Actuators," *Journal of Sound and Vibration*, (to appear).
- (26) Dosch, J.J., Inman, D.J. and Garcia, E., 1992, "Measurement of Strain and Stress in a Piezoelectric Actuator for Collocated Control," *Institute of Physics Publishing*, pp. 195~198.
- (27) Edberg, D.L., Blcos, A.S. and Fechter, J.S., 1991, "On Piezoelectric Energy Conversion for

- Electronic Passive Damping Enhancement," Damping '91 Conference, San Diego, CA.
- (28) Fanson, J.L. and Caughey, T. K., 1987, "Positive Position Feedback Control for Large Space Structures," Proceedings of 28th Structural Dynamics Conference, Monterey, CA, pp. 588~598.
- (29) Fanson, J.L., Lurie, B.J., O'Brien, J.F. and Chu, C.C., 1991, "System Identification and Control of the JPL Active Structure," AIAA-91-1231-CP, pp. 2247~2254.
- (30) Forward, R.L., 1979, "Electronic Damping of Vibrations in Optical Structures," Applied Optics, Vol. 18, No 5, pp. 690~697.
- (31) Forward, R.L. and Swigert, C.J., 1981, "Electronic Damping of Orthogonal Bending Modes in a Cylindrical Mast-Theory," Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 18, pp. 5~10.
- (32) Fujita, T., Tagawa, Y., Murai, N., Shibuya, S., Takeshita, A. and Takahashi, Y., 1991, "Active Microvibration Control System Using Piezoelectric Actuator," Second Joint Japan/U.S. Conference on Adaptive Structures, pp. 356~371.
- (33) Garcia, E., Dosch, J and Inman, D.J., 1991, "The Application of Smart Structures to The Vibration Suppression Problem," Second Joint Japan/U.S. Conference on Adaptive Structures, pp. 332~339.
- (34) Garcia, E. and Inman, D.J., 1990, "Advantages of Slewing and Active Structures," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 1.
- (35) Garcia, E. and Inman, D.J., 1990, "Modeling of the Slewing Control of a Flexible Structures," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 1.
- (36) Griffin, S.F. and Denoyer, K. K., 1992, "Smart Patch Piezoceramic Actuator Issues," The Fifth NASA/Dod CSI Technology Conference.
- (37) Hagwood, N.W., Chung, W. H., and von Flotow, A., 1990, "Modelling of Piezoelectric Actuator Dynamics for Active Structural Control," Journal of Sound and Vibration. Vol. 1, No. 3.
- (38) Hagwood, N.W. and von Flotow, A., 1991, "Damping of Structural Vibrations with Piezoelectric Materials and Passive Electrical Networks," Journal of Sound and Vibration. Vol. 146, No. 2, pp. 243~268.
- (39) Hanagud, S., Obal, M.W., and Calise, A.J., 1992, "Optimal Vibration Control by the Use of Piezoceramic Sensors and Actuators," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 15, No. 5, pp. 1199~1206.
- (40) Holland, R., 1967, "Resonant Properties of Piezoelectric Ceramic Rectangular Parallelepipeds," Vol. 43, No. 5, pp. 988~997.
- (41) IEEE Std 176-1978, 1978, IEEE Standard on Piezoelectricity, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, pp. 8~14.
- (42) Inman, D.J. and Garcia, E., 1991, "Smart Structures for Vibration Suppression," Institute of Sound and Vibration Research, pp. 137~155.
- (43) Jaffe Jr., B., Cook Jr., W.R. and Jaffe, H., 1971, Piezoelectric Ceramics, Academic Press.
- (44) Khorrami, F. and Zeinoun, I. J., 1993, "Rapid Slewing and Pointing of a Flexible Structure with Embedded Piezoceramics," SPIE Vol. 1917, Smart Structures and Intelligent Systems, pp. 25~36.
- (45) Kwak, M.K., Denoyer, K.K. and Sciulli, D., 1995, "Dynamics and Control of a Slewing Active Beam," Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 18, No. 1, pp. 185~186.
- (46) 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, (to appear).
- (47) Lazarus, K.B. and Crawley, E.F., 1992, "Multivariable High-Authority Control fo Plate-Like Active Structures," AIAA Paper 92-2529.
- (48) Lee, C.K., Chiang, W.W., and O'Sullivan, T.C., 1989, "Piezoelectric Modal Sensor and Actuators Achieving Critical Active Damping on a Cantilever Plate," IBM Research Report, pp. 2018~2026.
- (49) Lee, C.K. and Moon, F.C., 1989, "Laminated Piezopolymer Plates for Torsion and Bending Sensors and Actuator," Journal of Acoustical Society of America, Vol. 85, No. 6, pp. 2432~2439.
- (50) Lee, C.K., Chiang, W.W., and O'Sullivan, T.C., 1991, "Piezoelectric Modal Sensor/Actuator Pairs for Critical Active Damping Vibration Control," Journal of Acoustical Society of Amer-

- ica, Vol. 90, No. 1, pp. 274~384.
- (51) Lee, C.K., Chiang, O'sullivan, T.C., and Chiang, W.W., 1991, "Piezoelectric Strain Rate Sensor and Actuator Designs for Active Vibration Control," AIAA-91-1064-CP, pp. 2197~2207.
- (52) Li, C.J., Beigi, H.S.M., Li, S. and Liang, J., 1993, "Nonlinear Piezo-Actuator Control by Learning Self-Tuning Regulator," Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 115, pp. 720~723.
- (53) 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.
- (54) McDearmon, G.F., 1984, "The Addition of Piezoelectric Properties to Structural Finite Element Programs by Matrix Manipulations," Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 76, No. 3.
- (55) Meirovitch, L., 1989, Dynamics and Control of Structures, John Wiley & Sons.
- (56) Miccoli, G., Concilio, A. and Lecce, L., 1994, "Research Activity on Noise and Vibration Active Control by Piezoceramic Transducers," Proceedings of the 12th International Modal Analysis Conference, pp. 606~612.
- (57) Mitchell, J.A. and Reddy, J. N., 1993, "Study of the Effect of Embedded Piezoelectric Layers in Composite Cylinders," SPIE Vol. 1917, Smart Structures and Intelligent Systems, pp. 440~450.
- (58) Nisse, E.P.E., 1967, "Variational Method for Electroelastic Vibration Analysis," IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, Vol. Su-14, No. 4, pp. 153~160.
- (59) Paige, D.A., Scott, R.C. and Weisshaar, T.A., 1993, "Active Control of Composite Panel Flutter Using Piezoelectric Materials," SPIE Vol. 1917, Smart Structures and Intelligent Systems, pp. 84~97.
- (60) Park, C., Walz, C. and Chopra, I., 1993, "Bending and Torsion Models of Beams with Induced Strain Actuators," SPIE Vol. 1917, Smart Structures and Intelligent Systems, pp. 192~1216.
- (61) Poh, S. and Baz, A., 1990, "Active Control of a Flexible Structure Using a Modal Positive Position Feedback Controller," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 1.
- (62) Pota, H.R., Alberts, T.E., and Peterson, I.R., 1993, "H[∞]Control of Flexible Slewing Link with Active Damping," SPIE Vol. 1917, Smart Structures and Intelligent Systems, pp. 25~36.
- (63) Robbins Jr., D.H. and Reddy, J.N., 1993, "Modeling of Actuators in Laminated Composite Structures," SPIE Vol. 1917, Smart Structures and Intelligent Systems, pp. 485~496.
- (64) Shah, D.K., Joshi, S.P. and Chan, W.S., 1993, "Structural Response of Plates with Piezoceramic Layers," SPIE Vol. 1917, Smart Structures and Intelligent Systems, pp. 428~439.
- (65) Shen, I.Y., 1994, "A Study of Active Constrained Layer Damping Treatments on Composite Beams," US Airforce Phillips Lab Internal Report.
- (66) Shibuta, S., Morino, Y., Shibayama, Y. and Sekine, K., 1991, "Adaptive Control of Space Truss Structures by Piezoelectric Actuator," Proceedings of the Second Joint Japan/U.S. Conference on Adaptive Structures, pp. 245~262.
- (67) Singh, D.A. and Vizzini, A.J., 1993, "Structural Integrity of Composite Laminates with Interlaced Piezoceramic Actuators," SPIE Vol. 1917, Smart Structures and Intelligent Systems, pp. 473~484.
- (68) Sullivan, J.M., Hubbard Jr., J.E. and Burke, S.E., 1994, "Distributed Transducer Design for Plates: Spatial Shape and Shading as Design Parameters," SPIE 1994, North American Conference.
- (69) Sun, W., 1993, "Modeling of Flexible Piezoelectric Laminates," SPIE Vol. 1917, Smart Structures and Intelligent Systems, pp. 497~507.
- (70) Tzou, H.S. and Gadre, M., 1988, "Active Vibration Isolation by Polymeric Piezoelectric with Variable Feedback Gains," AIAA Journal, Vol. 26, pp. 1014~1017.
- (71) Tzou, H.S. and Tseng, C.I., 1990, "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.
- (72) Tzou, H.S., Tseng, C.I. and Wang, G.C., 1990, "Distributed Structural Dynamics Control of Flexible Manipulators-II. Distributed Sensor and Active

- Electromechanical Actuator," Computers & Structures, Vol. 35, No. 6, pp. 679~687.
- (73) von Flotow, A.H. and Vos, D. W., "The Virtues of Passive Damping in Controlled Structures,"
- (74) 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.
- (75) Wu, Z., Bao, X.Q., Varadan, V.K. and Varadan, V.V., 1991, "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.
- (76) Yeh, M.K. and Chin, C.Y., 1994, "Dynamic Response of Circular Shaft with Piezoelectric Sensor," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 5, pp. 833~840.
- (77) 김 승환, 최 승복, 정 재천, 1993, "압전 필름을 이용한 외팔보의 능동진동제어," 한국항공우주학회지, 제21권, 제5호, pp. 76~87.
- (78) 김 종선, 1992, "압전소자를 액추에이터로 이용한 탄성 보의 능동제어," 한국소음진동공학회지, 제2권, 제3호, pp. 173~180.
- (79) 남 창호, 황 재혁, 오 승민, 1993, "압전재료가 있는 복합재 평판의 진동제어를 위한 구조/제어 최적설계," 한국항공우주학회지, 제21권, 제4호, pp. 49~59.
- (80) 윤 광준, 1994, "신경 제어 섬유 강화 복합재료의 개발 및 응용에 관한 연구," 93 첨단 공학(신소재분야) 연구 보고서, 교육부.
- (81) 윤 광준, 이 영재, 김 현수, 1994, "압전세라믹 작동기와 폴리머 센서를 이용한 유리/에폭시 복합 재료 외팔보의 능동 억제," 한국복합재료과학회지, 제7권, 제1호, pp. 48~56.
- (82) 황 우석, 박 현철, 1993, "유연보 진동제어를 위한 압전감지기/작동기 설계," 한국항공우주학회지, 제21권, 제2호, pp. 26~36.