

## 능동 소음/진동 제어의 해외 연구동향

■ 백 광 현 / 단국대학교 기계공학과 교수

어떻게 하면 원치 않는 소음으로부터 주거, 사무, 휴식 환경을 결리시킬 수 있을까는 하는 바램은 인류의 오랜 숙원중 하나로서 수없이 많은 연구가 이루어져온 분야이다. 과거엔 수동제어, 즉 소리나 진동이 잘 생기지 못하도록 혹은 투과하지 못하도록 전달경로의 재료를 바꾸거나 방음/방진장치를 덧붙이는 방식을 사용해 왔다. 물론 지금도 이는 매우 효과적인 방법이다. 이것과는 달리 컴퓨터의 발달로 1980년대 들어 본격적인 능동음향 제어기술이 구현되어 나왔을 때 머지않아 원치 않는 소음으로부터 사람들이 거의 자유로와 질 것이라는 기대를 불러 일으켰었다. 즉 이 능동음향 제어기술이 과대포장 또는 과대평가됨으로써 마치 "마법의 기술"로서 시끄러운 소음이 짝 사라지는 것인양 인식되기도 했다. 그래서 많은 연구자들이 뛰어들었으나 아직까지 특정 응용에 (프로펠러비행기의 기내 능동소음제어 시스템- 영국 Ultra Electronics, 헬리콥터 로터 진동격리제어- 영국 GKN-Westland Helicopters)를 제외하곤 보편적인 상용화기술로 적용하기엔 한계를 보였다. 이에 따라 순수 능동음향제어 연구보다는 좀 더 실현성이 있는 능동구조음향제어와 능동진동제어쪽으로 연구분야의 중점이 옮겨가는 현상을 보이고 있다.

### 1. 능동구조음향제어

음향제어의 주된 연구자리를 이미 차지한 능동구조음향제어 분야는 과거 복수 개의 스피커를 이용한 실내음향제어의 한계(많은 스피커의 사용에 의한 공간, 비용,

무게문제 및 광대역 소음제어 한계, 다중채널로 인한 제어의 복잡성 및 안정도 문제 등등)를 극복하기 위해 단일 입력 단일출력의 단순화된 제어시스템을 구현하기 위해 구조물을 투과하는 소리를 구조물에 압전물질 등을 위주로 하는 지능재료등을 이용한 액츄에이터를 결합시켜 투과손실을 증가시키고자 하는 것이었다. 현재까지는 주로 항공기, 자동차, 기차 등을 응용대상으로 얇은 판에 대한 능동구조음향제어가 집중적으로 연구 되고 있다.

이전에는 판 근처에 위치한 오차 감지 마이크로폰으로 투과된 소리를 피드백시키다가, 판의 음향방사가 판의 체적속도에 비례한다는 이론하에 판에 직접 체적속도를 감지하는 지능센서를 부착시켜 음향투과를 제어하는 시도가 이루어졌다. 그 이후 동위치화시킨 지능센서와 액츄에이터를 판에 부착시키고 그 판의 체적속도를 피드백 (Direct Velocity Feedback- DVFB)시키는 연구로 발전하였으나, 변위량에 기초하는 지능센서와 액츄에이터의 동위치화에 따른 면내진동과 면외진동의 연성현상으로 인해 제어의 성능과 안정도가 기대에 훨씬 못 미치는 것으로 나타났다.

영국 ISVR 연구진은 이런 연성 현상을 극복하여 DVFB를 적용가능한 센서-액츄에이터의 조합으로 판의 음향투과제어에 관한 새로운 대안을 제시하였다. 이는 가속도계를 센서로서 압전액츄에이터 패치와 쌍을 이루도록 판에 복수개를 배치하여 각 센서-액츄에이터 쌍에 DVFB를 하나씩 적용시켜 비중앙화된 (decentralised) 제어를 하는 것으로 매우 뛰어난 성능과 안정도를 보여주었다.

이런 능동구조음향제어나 능동진동제어도 과거의 다중입력 및 다중출력 (MIMO) 의 중앙집중식 제어기 (centralised controller)에서 복수개로 구성된 단일입력 및 단일출력 (SISO)의 비중앙식 제어기 (decentralised controller)로 바뀌고 있다. 이는 음향/진동제어에 있어 MIMO 시스템은 하나의 센서 또는 액츄에이터의 오작동이 전체 시스템의 안정도 및 성능을 크게 떨어뜨릴 뿐 아니라 시스템 구성이 매우 복잡하다. 하지만 복수개의 SISO는 간단할 뿐만 아니라 하나의 센서 또는 액츄에이터의 오작동이 전체 시스템의 안정도 및 성능에 거의 영향을 주지 않는다. 이것은 좀 더 실제응용에 가까워졌다는 평가를 받았다.

아울러 미국 Virginia Tech에서는 판의 방사소음제어를 위한 분포식 능동흡진기 (Distributed Active Vibration Absorber- DAVA)라 불리는 장치에 대한 연구를 하였다. 또한 체적속도제어가 적용되기 힘들 정도의 큰 구조물이나 복잡한 구조물의 음향구조진동제어를 위해 파동수영역 피드백 제어 (Wavenumber Domain Feedback Control- WDFC)가 제시되었다. 그리고 요즘의 아파트에서와 같은 환경하에서 윗층의 애들이 쿵광거리며 뛰어다니는 임펄스 소음을 줄이기 위해 압전 액츄에이터를 이용한 소음차단바닥에 대한 연구, 항공기나 자동차같은 운반체가 고속으로 달리 때 발생하는 유체유동소음 차단에 대한 연구 등이 관심을 모았다. 관련된 많은 연구 결과 중 대표적인 두 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

**Smart panel with multiple decentralised units for the control of sound transmission, Part I: Theoretical Predictions, Part II: Design of the decentralised control units, Part III: Control system implementation**  
**(Paolo Gardonio, Emanuele Bianchi and Stephen J Elliott, ISVR, University of Southampton, England)**

이 연구는 제목에서 보는 바와 같이 3개의 파트로 나눠 발표되었는데 요약하면 다음과 같다. 이 연구는 판의 진동과 음향방사 및 투과를 줄이기 위한 비중앙화된 진동제어 시스템에 관한 것으로서 16개의 가속도계를 센서로 그리고 같은 갯수의 압전세라믹 액츄에이터를 그림 1에서 보는 바와 같이 판에 균일하게 4 X 4 형

태로 배치하였다.

각각의 동위치화된 센서-액츄에이터 쌍에 속도 피드백 제어 (DVFB)를 적용시켜 서로 독립된 16개의 피드백 루프를 만들어 능동음향진동제어에 적용하였다.

이것은 진동하는 판을 단순한 속도 피드백 제어를 하여 16개의 지점에 능동 댐핑을 추가한 것으로 판의 진동레벨을 감소시킬 뿐 아니라 음향투과를 저감시키는데 사용되었다. 실제 판에 대한 능동제어 실험 결과 최초 3개의 공진주파수에 대해 각각 10dB, 15dB 그리고 또 15dB의 음압레벨의 감소를 가져왔다

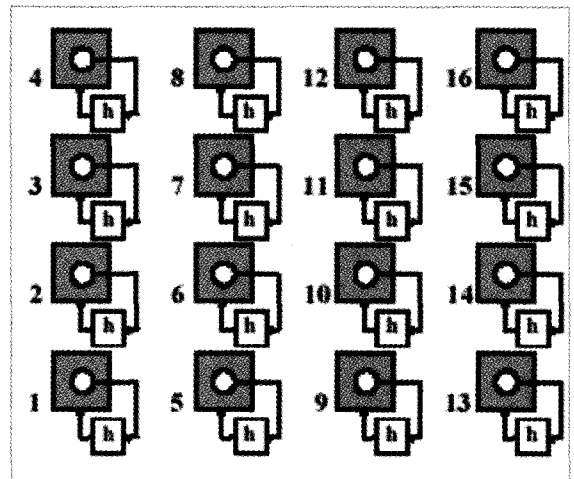


그림 1 판에 균일하게 배치한 비중앙화된 4x4센서-액츄에이터쌍.

**Numerical modelling of distributed active vibration absorbers (DAVA) for control of noise radiated by a plate**

**(P Marcotte, C R Fuller and M E Johnson, Virginia Tech, Blacksburg, USA)**

판의 소음제어를 위해 분포식 능동흡진기 (DAVA)를 적용하는 것에 관한 수치적 연구이다. DAVA는 재래식 흡진기의 연장으로서 구조물에 부착되는 탄성 능동층과 질량층으로 구성되어 있는 능동/수동 시스템이다.

이 연구에서는 판의 음향 투과를 최소화하기 위해 복수개의 DAVA를 유전자 알고리즘을 적용 구성하였다. DAVA의 중량이 판의 전체 중량의 10%를 넘지 않도록 제한하였으며, 음향투과율이 높은 주파수 대역인 판의 첫 번째 공진모드에서 매우 뛰어난 수동 및 능동 제어성능을 보여주었다.

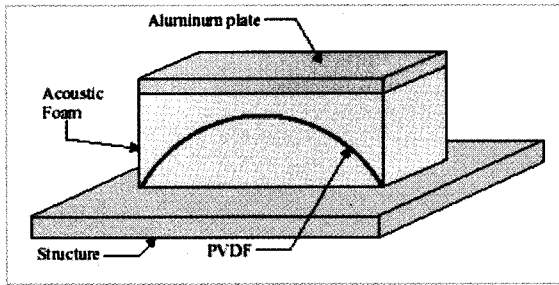


그림 2 흡음재와 PVDF 탄성층을 가진 DAVA

## 2. 능동진동제어

소리의 제어에서 시작된 능동제어분야가 진동제어에도 효과적으로 응용되고 있다. 주로 수동적 댐핑을 위주로 해오던 진동제어가 지능재료를 이용한 센서 및 액추에이터의 발달에 따라 능동적 댐핑을 진동제어에 적용하려는 연구가 계속 증가되고 있다.

요 근래에는 더욱 세분화 되고 다양해진 연구가 진행되고 있다. 특히 수동적 방법으로 제어하기 어려운 고정밀기계 등의 지속적이고 미소한 진폭의 진동 문제나 마이크로미터 단위의 진동문제에 대한 능동적 제어의 적용에 대한 연구, 능동댐핑을 위한 속도 피드백 제어시 발생하는 지능센서 및 액추에이터의 동위치 (collocation) 문제 관련 연구, 능동적 점탄성 레이어를 이용한 능동진동제어에 관한 연구, 축방향 이송출의 진동문제에 대한 경계제어 연구, 구조인텐시티를 이용한 시간영역에서의 능동진동제어 연구, 유체유동으로 인한 파이프 진동의 능동제어에 관한 연구, 그리고 능동 클러스트 제어라는 새로운 개념의 진동제어를 제시한 연구 등이 있다. 흥미 있는 두 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

### Active vibration control for an optical delay line

(N J Doelman and T C van den Dool, TNO-TPD, Delft, The Netherlands)

광학 딜레이 라인은 나노미터의 정밀도를 요구하는 광학적 경로길이를 생성시키는 장치이다. 광학적 경로의 길이는 일반적으로 큰 외란 (마이크로미터 스케일)에 놓여진 가운데 특정 궤적을 추종해야만 한다. 이 연

구는 능동소음제어 분야에서 채택된 적응제어 기법이 광학 딜레이 라인의 서보 및 레귤레이션 작업에 잘 사용될 수 있음을 보여주며 실험실에서 수행된 계측 결과는 추종 성능이 좋고 외란 제거성능이 높음을 보여주었다.

### Active cluster control for a distributed-parameter planar structure

(N Tanaka, Tokyo Metropolitan Institute of Technology, Tokyo, Japan)

구조모드의 특정된 그룹핑을 제어하는 (controlling designated groupings of structural modes) “클러스트 제어”라는 새로운 능동제어기법으로, 이 방법은 재래적인 LAC (Low Authority Control)와 HAC (High Authority Control)의 사이에 위치하는 MAC (Middle Authority Control) 범주에 분류 가능한 것으로, LAC와 유사한 안정도와 단순한 제어법칙을 가지며 동시에 HAC와 유사한 높은 제어성능과 유연한 제어이득배정을 할 수 있다. 이 연구는 구조물의 고유함수 (eigenfunctions)가 “클러스트” 또는 그룹의 형태로 표현되는 분산파라미터 평면구조 (distributed-parameter planar structure)의 클러스트 필터링에 대한 개념으로부터 시작한다. 센싱과 액추에이션사이의 상반원리 (reciprocity principle)에 바탕을 둔 클러스트 액추에이션과 클러스트 제어에 관련된 연구로서, 재래적인 DVFB는 클러스트제어 방법론 상의 특별한 경우에 해당됨을 이 연구는 보여 주며, 클러스트 제어를 이용한 실제 실험결과도 있다.

## 3. 능동음향제어

능동음향제어에 관한 연구는 능동음향제어, 운반체의 능동음향제어, 피드백 제어, 덕트내의 능동제어, 실외음향능동제어와 관련하여 행해지고 다있다. 실내의 능동음향제어에서는 global 제어보다는 local 제어가 현실성이 있어 주로 연구되고 있으며, 음영지역(zone of quiet)을 가상 마이크로폰(virtual microphone)을 이용 active headrest의 형태로 구현 하려는 연구가 지속되고 있다. 회전하는 팬의 소음에 대한 능동제어문제와 함께 피드백을 적용한 능동청각보호장치도 관심을 끌고 있는 연구 주제이다. 자동차와 관련해서는 배기

소음의 능동감소기법에 대한 연구가 주류를 이루고 있고, 광대역 도로 소음 및 엔진소음 관련 능동제어도 빠지지 않는 주제이다. 현실적인 문제에 적용하려는 대표적 두가지 연구는 다음과 같다.

**ANC applied to building elements: real scale realization**

**(F Valentini and F Scamoni, ICITE-CNR National Council of Research, Italy)**

건물내의 음향학적 성능을 향상시킬 필요성과 전통적인 기술의 한계점을 극복하려는 시도에서 능동소음제어를 창문, 그리고 수직분리벽과 같은 건물요소들에 적용시키고자 하는 것이다. ICITE-CNR에서는 능동 창문과 능동 분리벽이라는 두 개의 원형을 설계하였다. 이들 원형은 실험실과 실험용 건물에 대해 모두 시험하였다. 능동 창문은 표준 크기의 창문에 마이크로폰과 스피커를 둘레에 설치하기 위해 개조를 하였다. 이 장치들은 열린 창문을 통해 들어오는 소음을 제어하기 위한 것이다. 능동분리벽은 이중벽으로 제작되었다. ICITE-CNR에서의 연구는 기존의 건물에 바로 적용가능하게끔 능동창문과 분리벽을 설계하여 시장에 내놓기 위한 것이다.

**Subjective considerations in multichannel active noise control equalization of repetitive noise**

**(A Gonzalez, M Ferrer, M de Diego and G Pinero, Universidad Politecnica de Valencia, Spain)**

운반체 내부에서 능동소음제어의 궁극적인 목표는 저주파의 소음레벨을 낮추는 것 뿐 아니라 사람이 듣기에 유쾌함을 제공해야 하는 것이다. 운전자는 아마 고요함보다는 운전의 안전도를 향상시키고 편안함을 느낄수 있는 소리를 원할 것이기 때문이다. 그러나 이것은 개개인의 취향이 다른 관계로 단순한 문제가 아니다. 지금까지 능동소음제어 환경하에서 청취자의 반응에 대한 연구는 거의 되어 있지 않았다. 단일주파수를 가지는 소음원에 대하여 다중채널의 능동소음 이퀄라이저(ANE)의 구현을 통해 운반체 내부의 반복소음을 웨이핑 하는 것이다. B&K의 타입 4100 마네킹을 사용하여 청취자의 헤드모션을 고려할 수 있을 정도의

큰 실험적 이퀄라이제이션 구역을 성공적으로 구현하였다. 그리고 나서, 능동적으로 제어되는 차량내부의 소음을 사람별로 해석을 하였는데 두 가지 방법이 적용되었다. 이들은 jury test를 통한 제어된 신호의 사람별 평가 및 loudness, sharpness, roughness 그리고 tonality 에 관련된 심리음향학적 파라미터에 기초를 둔 경험적 추정자 (estimator)의 이용이다. 또한 사람들이 선호하는 소리와 심리음향학적 파라미터들간의 관계에 대해 해석하였다.

**결 언**

간략히 능동 제어와 관련한 해외 연구 동향에 대하여 요약해 보았다. 크게 두 가지의 새로운 흐름이 눈에 띈다 할수 있을 것 같다.

첫째는, 능동음향제어에서는 비중양화된 복수개의 동위치화된 센서-액츄에이터 배치를 가진 속도피드백(DVFB) 제어 시스템의 출현을 꼽을수 있을것 같다. 성능, 안정성 그리고 실현 가능성에서 매우 높은 관심과 호응을 이끌고 있다.

둘째는, 능동음향제어는 소음을 제거하는 기술이어서 이것을 적용시키면 흔히 매우 어색한 음향환경에 접하게 된다. 즉 모든 소리가 사라진듯한 아무 소리가 들리지 않는 인공적 음향상황에 놓이게 되는 것이다. 어느 정도의 자연스런 소리가 있어야 심리적으로 편안함을 느끼는 심리음향학에 바탕을 둔 Sound Quality Control 이란 연구분야가 관심을 이끌고 있다. 기존의 연구는 무조건 소리를 없애려는 연구인 반면 이것은 좀 더 진일보한 것으로서 불필요한 소리만을 제거하는 기술이다.

과거에는 피드포워드 제어가 주요 연구대상이었으나 이제 피드백 제어가 지배적으로 자리잡게 되었으며, 능동 구조음향제어 (ASAC), 능동진동제어, 능동진동격리 등과 음질제어 (Sound Quality Control)를 비롯, 연구분야가 더욱 세분화되었다. 지능재료의 채택이 보편화되었으며, 실제 응용이 가능하도록 현실적인 방향으로의 개발이 폭 넓고 심도있게 진행되고 있다. 자동차에 대한 적용보다는 항공기 및 우주구조물에 대한 연구가 여전히 더 많으나, 전통적인 덕트나 팬소음 등에 대한 제어 연구도 꾸준히 지속 되고 있다.