

소음 진동의 최적설계 및 제어 연구

왕세명* · 김상명

(광주과학기술원 기전공학과)

1. 머리말

광주과학기술원 기전공학과와 설계 및 음향제어 연구실은 왕세명, 김상명 교수와 Sarbu 연구교수, 그리고 17명의 대학원생으로 구성되어 있다. 왕세명 교수는 음향 및 전자기 시스템의 최적설계를 그리고 김상명 교수는 능동음향제어를 연구한다.

속체 설계 민감도 해석법과 보조 변수법을 사용하므로 설계 변수의 수에 상관없이 빠른 시간 안에 더 정확한 민감도 계산을 수행할 수 있다. 이를 이용 하여, 모두 두 번의 설계 변경을 통해서 4 dB의 진동을 줄일 수 있었다.(그림 2)

2. 연구 분야

주요 연구 분야는 아래 세 가지로 구분된다. 우선 음향 및 소음진동 시스템의 최적설계 및 제어를 연구하는 소음진동분야, 최적화 방법론 및 프로그램을 개발하는 최적설계분야, 그리고 최적설계이론을 전자기 시스템에 적용하는 전자기분야로 구분된다.

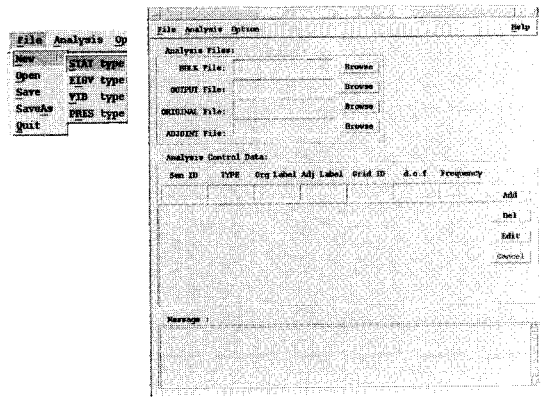


그림 1 SENS의 실행 화면

2.1 음향 및 소음진동 설계 및 제어

(1) 소음진동 최적설계

- 자동차의 소음진동 최적설계

승용차의 실내 소음 및 진동 저감을 위해 설계 민감도 해석 및 최적 설계가 수행되었다. 본 연구에서는 자체적으로 개발한 설계 민감도 해석 프로그램인 SENS(그림 1)를 사용하였다. SENS는 연

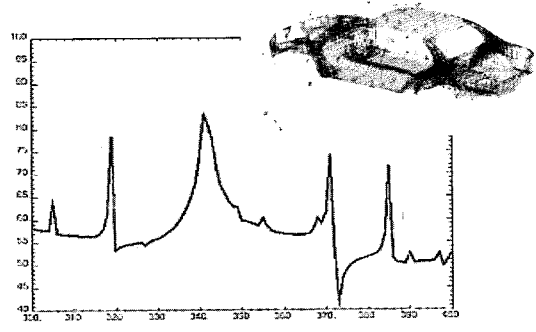


그림 2 자동차 FEA 모델과 초기설계(회색) 그리고 최적설계(흑색)

* 우리 학회 편집위원
E-mail : smwang@kjist.ac.kr

- 정보 저장기기의 소음진동 최적설계

하드 디스크 드라이브(hard disk drive, HDD)는 크게 두 부분으로 구성되어 있는데, 반도체 칩, 마이크로 프로세서, 기타 전기적 부품이 조립되어 있는 프린터 기판과 주로 헤드와 디스크, 스피들 모터의 조립 동체이다. 이들 중 HDD의 주진동원은 BLDC(blushless DC) 스피들 모터와 VCM(voice coil motor)이다. 특히, 스피들 모터에 진동 문제가 발생하면 정보를 읽고 기록하지 못하게 되는 치명적 문제가 일어난다. 본 연구실에선 양산되는 BLDC 스피들 모터의 고유치 설계 민감도 해석을 수행했고 실제 설계 변경하여 제작한 스피들 모터의 실험결과와 비교함으로써 CAE에 의한 CAT를 통하여 검증하였다.

- 컴프레서의 소음진동 최적설계

압축기(compressor)는 전자기력을 기계적 운동으로 변화 시켜 냉난방에 필요한 냉매를 압축시키는 기구으로써 전기, 열, 유체 등의 복잡 다양한 영역의 문제를 포함하고 있는 대상체이다.

선형 압축기(linear compressor)는 선형 전동기(linear motor)에 의하여 구동하게 되고, 회전 운동을 직선 운동으로 변환하는 다른 압축기와는 달리 전동기의 선형 운동이 피스톤과 실린더가 포함되어 있는 압축부로 직접 전달되기 때문에 마찰 손실이 적게 발생하여 고효율을 가질 수 있다.

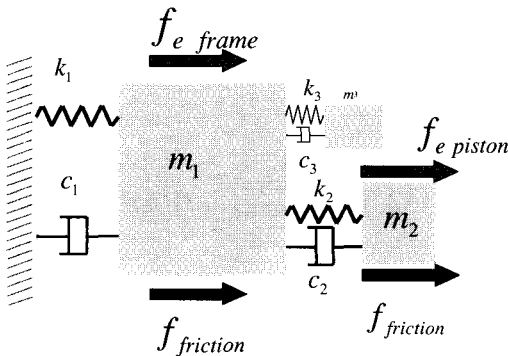


그림 3 리니어 컴프레서의 수치해석 모델

본 연구에서는 상대운동을 하는 자석과 고정자의 동역학적인 운동과 관련한 전자기적 힘에 의한 편심력의 발생을 연구 하였다. 이러한 편심력은 선형 압축기의 주요 소음원이 될 뿐 아니라, 발생된 진동은 압축기의 압축부, 즉 실린더와 피스톤의 마모현상을 과도하게 증폭시킬 수 있다. 따라서 자석과 고정자의 형상설계를 통하여 전자기적 원인에 의한 편심력 저감으로 전체적인 소음과 진동을 줄이는 연구를 진행중이다.

회전식 압축기(rotary compressor)는 고정자의 내경방향으로 회전하는 로터의 회전운동을 이용하여 냉매를 압축하는 기구이다. 고압의 압축과정 때문에 에어컨등의 주요한 소음 진동원이 되는데 본 연구실의 연구를 통하여 고속 회전하는 로터를 지지하는 지지부의 공진현상이 셸을 통하여 소음 문제를 일으키는 것과 압축되기 전의 냉매의 저장 공간인 accumulator의 공진현상이 소음을 유발시키는 것을 실험적으로 밝혀내고 최적화 기술을 이용한 구조 변경을 통하여 소음저감 연구를 수행하였다.(그림 4)

왕복동식 압축기(reciprocal compressor)는 냉장고 등의 주요한 소음원으로 압축 시 발생하는 격심한 내부의 가진이 압축부를 지지하고 있는 지지 스프링(suspension spring)을 통하여 셸을 가진시켜 소음을 유발한다.(그림 5) 본 연구에서는 왕복동식 컴프레서의 주요한 소음 피크들이 셸의 공진주파수에 많은 영향을 받고 있음을 실험적으

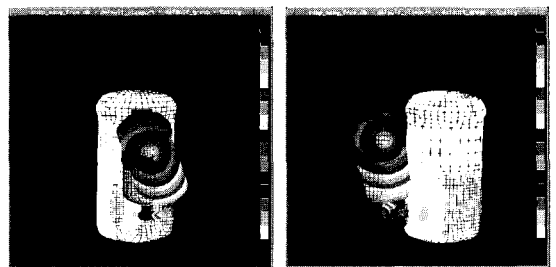


그림 4 Accumulator의 공진모드

로 파악하고 셀의 공진주파수를 고차의 대역으로 옮김으로서 전체 소음값을 줄이는 연구를 수행하였다. 또한, 방사소음의 심리음향학적 음질분석을 통하여 문제 주파수 영역을 파악하고 그의 저감을 위한 소음기 및 마운트설계 연구를 수행중이다.

(2) 소음진동 측정 및 해석

또한, 본 연구실에서는 소음 진동의 측정과 해석 알고리즘에 대한 연구도 진행하고 있다. 전동기의 결함을 진단하기 위한 소음전문가 시스템이 연구되었고, 비접촉 레이저 도플러 진동계를 이용한 연속 스캐닝 방법에 대한 연구가 현재 진행중이다.

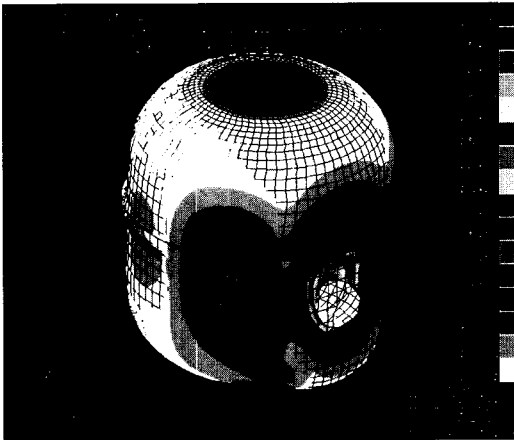


그림 5 소음 영향이 큰 회전식 압축기 셀의 공진

전동기의 결함을 감시하고 판별하는 방법에는 여러 가지가 있는데, 본 연구에서는 그 방법 중 하나로써 전동기의 소음신호를 측정후 해석하는 방법을 이용하였다.(그림 6) 우선, 특정한 위치에서 마이크로폰을 이용하여 음압의 시간데이터를 확보한다. 그 데이터를 주파수 분석 기법을 이용하여 분석한 후, 특정결함에 따른 신호의 특성들을 파악하였다. 그 다음, 모터의 특성에 부합하는 결함판별기준을 제시하고 이를 검증하였다. 또한, 이를 시간영역에서 구현함으로써 실시간 결함판별 시스템의 개발가능성을 살펴보았다. 본 시스템을 사용하여, 정상모터와 베어링 결함이 있는 모터, 스키는 음이 나는 모터를 구분하였다.

한편, 조선대학교 제어계측공학과, 광주과기원 기전공학과 동역학 제어 실험실과의 협력 연구로서, 기존의 진동 측정 방식의 문제점을 해결하기 위한 장비인 연속 스캐닝 레이저 진동측정계의 개발을 진행중에 있다.(그림 7) 위의 두 연구실에서 광학계 및 스캐닝 제어 분야를 연구하고 있으며, 본 연구실에서는 측정된 연속 속도 신호로 모드 형상을 구해내는 알고리즘과 프로그램 개발을 담당하고 있다.

(3) 능동 소음진동 제어

잘 알려져 있듯이 능동제어는 파동의 상쇄간섭을 이용한 것으로 원음에 제어음을 더해 무음(1+1=0)을 얻으려는 시도이다. 소음을 음으로써

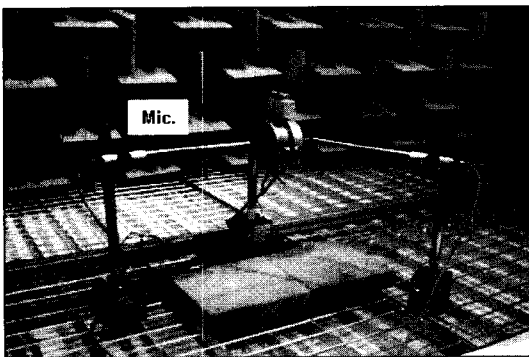


그림 6 소음 전문가 시스템 실험장면



그림 7 연속 스캐닝 진동계의 실험 장면

제어하는 의미에서 理音治音이라고도 할 수 있다. 능동제어는 수동적 방법으로는 저감이 곤란한 저주파 소음진동에 효과적인 방법이나, 제어시스템 구성으로 인한 단가 상승 등의 이유로 현재 상용화 연구는 비행기 및 헬리콥터 계기판 등 고가 시스템에 국한된다. 본 연구실은 인공위성 발사 시 폭발음으로 인한 인공위성 본체의 파손을 막기 위한 투과음의 능동제어와 비행 중 비행체 계기판의 진동절연을 위한 능동제어를 연구하였다. 주요 연구결과는 투과음 제어를 위해선 제어용 가진기와 스피커를 동시에 쓰는 것이 각각을 여러개 사용하는 것보다 효과적이라는 사실을 밝혔고, 능동진동절연은 계기판이 강제일때는 계기판 진동속도의 단순비례제어가 절대 안정한 최적의 방법임을 밝혔다. 그림 8은 4점 지지용 능동진동절연기로 계기가 안착되는 상판의 각 지지부에 부착된 4개의 가진기는 각 지지점의 속도진동을 단순 되먹임하여 바닥으로부터의 가진전달을 저감한다. 여기서 가진기의 힘 전달봉은 환형 고무 마운트 내부를 통해 바닥판으로 연결되어 있다. 현재 수행중인 연구로는 능동소음 저감용 헤드폰, 주파수 보정 가능한 동흡진기를 이용한 투과음 제어, 강제가 아닌 유연 계기판의 능동진동 절연 등이 있다.

(4) 오디오 신호 처리

앞에서의 설계 및 제어는 무익한 진동 및 음향



그림 8 4점 지지용 능동진동절연기

을 줄이려는 것에 반해, 오디오 신호처리는 유익한 진동이나 소리를 만드는 연구이다. 이 분야는 음향학, 신호처리 및 제어이론 뿐만 아니라 심리음향학에 대한 깊은 이해가 요구된다. 주요 적용 분야로는 통신시스템, 오디오 기기, 보청기 등이 있다. 주요 수행 연구는 통신 및 PA 시스템에서의 원음 재생 및 삼차원 입체음향과 음향회귀제어 등이 있다.

- 원음 재생 및 삼차원 입체음향 시스템

원음 재생은 삼차원 입체음향 재생을 위해 필수적인 기본 연구로 스테레오 스피커 재생 시 야기되는 스피커 자체의 기계-전기적 특성, 재생 시 좌우 음의 혼합, 청음실 환경에 따른 추가적 음향 특성 등을 배제시켜 녹음된 원음을 그대로 청취자에게 전달하고자 하는 연구이다. 주요 연구 성과는 PC 기반의 사운드카드를 이용한 원음재생 시스템을 개발하여 Wiener 필터가 기존의 역필터 설계법보다 효과적임을 보였고, 현재 강건성이 가미된 Wiener 필터에 대한 연구가 수행 중이다. 삼차원 입체음향 시스템은 삼차원 처리되어 녹음된 음을 원음재생 시스템에서 재생하는 시스템이다. 삼차원 처리를 위하여 삼차원 위치정보를 갖고 있는 인간의 머리관련 음향전달 함수를 이용하며, 그 측정 시스템을 그림 9에 보였다. 확대도에서 보인 것처럼 피측정자가 회전 의자에 앉아 귀에 파이프형(probe type) 마이크를 꽂고 회전각에 따른 스피커 마이크간의 음향전달함수를 측정하는 시스템이다. 회전각은 피측정자가 거울을 통해 바닥판의 눈금을 확인하여 조정한다.

- 음향 피드백 제거

음향 피드백은 통신 및 음향 시스템에서 스피커의 출력이 마이크 입력으로 되먹임 되어 메아리나 하울링을 야기시켜 실시간 양방향통신을 저해하는 현상이다. 현재 이의 저감을 위한 초보적인 연구로 광대역 및 협대역 실시간 적응 모델링 기법을 연구 중에 있다. 주요 적용 분야로는 기존 전화기, 핸드

프리 시스템, PA 음향시스템, 원거리회의 시스템 등이 있다. 추후 3차원 입체 음향 기술과 연동하여 현장감 있는 통신 시스템을 개발할 계획이다.

2.2 최적설계 알고리즘

최적설계 그룹에서는 최적설계 기법연구와 그러한 최적화 기법을 적용할 수 있는 툴의 개발에 목적을 두고 있다.

지금까지 주로 설계 민감도 해석, 형상, 크기최적설계, 위상최적설계, 반응표면법 등에 관한 연구와 최적화 모듈을 개발하여 국내 업체들과의 프로젝트를 수행하였으며, 최근에는 초탄성, 비선형 문제의 설계, 다분야 설계 민감도 해석 및 구조 전기 열 연성계의 위상최적설계, 신뢰성을 고려한 최적설계 및 6-시그마 디자인, 멀티 콤포넌트 위상최적설계, 근사화기법의 향상 등에 관한 연구를

하고 있다. 또한, 연구실 내의 다른 그룹인 소음진동, 전자기 그룹과의 협력을 통해 진보한 연구를 수행하고 있다.

현재까지 한양대 ERC인 최적설계 신기술 연구센터의 멤버로써 연구를 진행하고 있으며, 많은 논문을 발표하고 있다.

한편 최적설계 그룹에서 개발된 설계 관련 소프트웨어로는 앞서 설명한 SENS 이외에도 LG전자와의 프로젝트를 통해 개발된 ANSTOP, 그리고 FEM 모델 검증 및 수정 소프트웨어 CORREL 등이 있다.

ANSTOP은 위상최적설계(topology optimization) 전용 소프트웨어로서 ANSYS를 해석기로, SLP 알고리즘과 MMA를 최적화 기법으로, 보조변수법을 민감도 해석 기법으로 사용하고 있다.(그림 10) 구조문제에 대한 ANSTOP은 기본적으로 컴플라이언스, 변위, 응력, 고유치, 진동문제를 다룰 수 있고 초탄성, 비선형 문제, 신뢰성을 고려한 문제, 열변형을 고려한 문제를 풀기위한 모듈도 개발되었다. 또한 전자기 그룹과의 협력을 통한 전자기 문제의 위상최적설계 모듈도 개발되었는데, 최근에는 구조 전기 열 연성시스템에 대한 것도 연구와 함께 개발 진행중이다.

최적설계시에 주로 FEM 모델을 사용하는데,

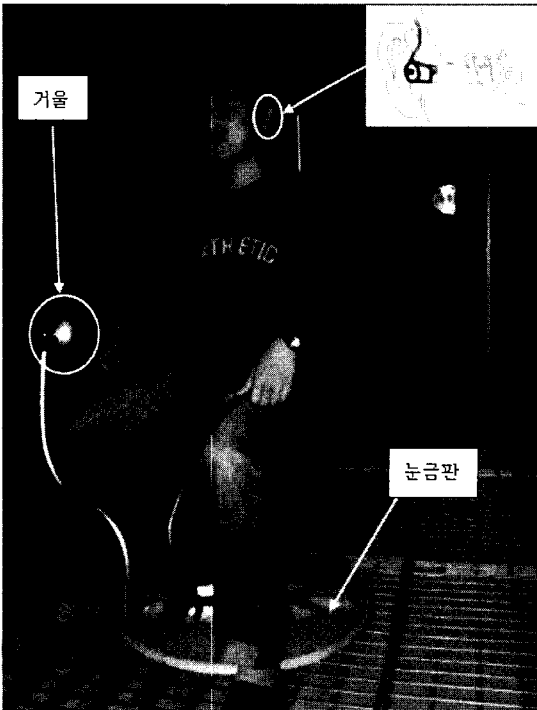


그림 9 HRTF 측정 실험

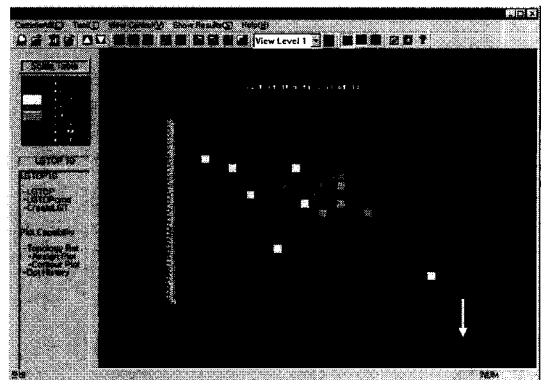


그림 10 ANSTOP의 GUI 환경

최적설계에 앞서 이러한 해석 모델과 실제 모델과의 유사성을 확인하기 위한 모델 검증 및 수정 과정이 필요하다. 실험 데이터에 기반한 FEM 모델 수정을 자동으로 수행하기 위해 개발된 소프트웨어가 CORREL이며, 그림 11은 하나의 실행단계를 보여주고 있다.

2.3 전자기 시스템

전자기 그룹에서는 전기기기 및 액추에이터의 해석 및 최적설계에 대한 연구를 수행한다.

정보 저장 기기나 산업 시스템 등에서 널리 사용되어 지고 있는 전기기기 및 액추에이터 등의 최적설계를 위해선 전자기적 특성들에 대한 정확한 해석이 필요하다. 이를 위해서 본 연구그룹에서는 FLUX, ANSYS 등의 상용화된 유한요소해석 프로그램을 사용한다.

구조역학 분야에서 처음으로 소개된 설계 민감도 해석(design sensitivity analysis, DSA)은 설계, 해석, 생산 과정을 연결하여 획기적으로 개발 시간을 줄일 수 있기 때문에, 본 연구그룹에서는 구조역학 분야에서 잘 발달된 설계 민감도 해석을 이용하여 전자기장의 최적설계를 위한 민감도 해석을 개발하였다. 그림 12는 전자기 그룹에서 윈도우 환경으로 개발한 전자기 형상최적설계 프로그램으로 형상최적화한 하드디스크용 BLDC 모터 코어의 형상이다.

또한, 비교적 짧은 역사에도 불구하고 초기 개념 설계에 중점을 두고 있는 위상최적설계(topology optimization)는 지금까지 많은 수학자와 공학자의 관심을 가져왔다. 본 연구 그룹에서도 전자기 시스템의 위상최적설계에 대한 연구를 수년 전에 시작하였는데, 그 방법은 구조 분야의 위상최적설계에 기초를 두고 있다. 현재, 개발된 전자기 시스템의 위상최적설계에 대한 기술을 모터의 최적설계에 적용하여 그 실효성을 검증하였다. 그림 13과 14는 단상유도모터의 위상최적설계 결과와 양산에 적용된 제품이다.

마지막으로, 본 연구그룹에서는 반도체 공정을 이용하여 제작하는 초소형 기계/전기 시스템, 즉 MEMS에 대한 연구도 진행하고 있다. 불과 20여년의 역사밖에 가지지 않은 MEMS 분야에서는 지속적으로 변화하고 발전하는 제작 공정 기술과 다

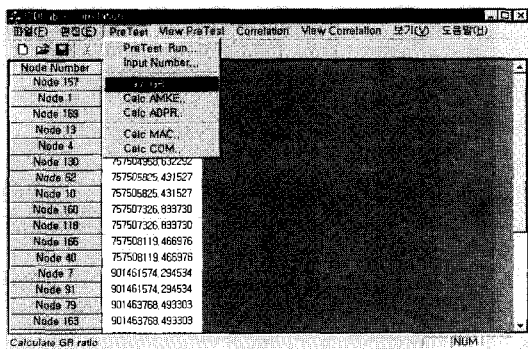


그림 11 CORREL의 실행

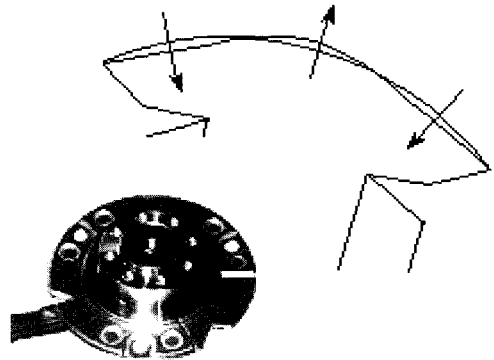


그림 12 BLDC 모터 코어의 초기와 최종 형상

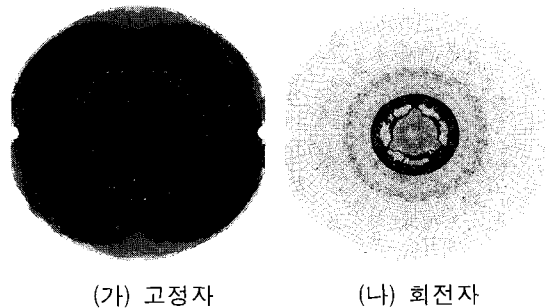


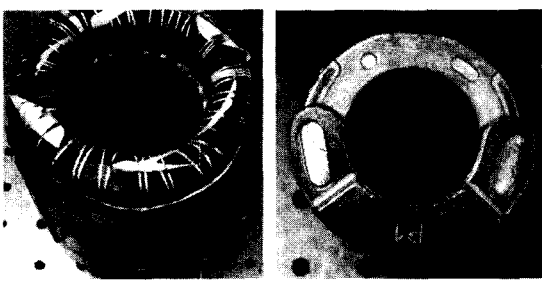
그림 13 단상 유도모터의 위상 최적설계 결과

양한 소재들에 대한 연구 결과에 힘입어 수년 전부터 다양한 제품이 만들어지고 있다. 하지만, MEMS 설계부분은 제작 기술, 소재 기술 등에 비해 발전 정도가 미약하다. 따라서 현재까지 전자기 연구그룹에서 개발된 최적설계 기술을 이용하여 MEMS의 구조 전자기 또는 구조 전자기-열 연성계에 대한 해석 및 설계에 대한 연구를 진행 중이다.

3. 연구실 연혁 및 보유장비

광주과학기술원 기전공학과 설계 및 음향 제어 연구실은 1995년에 왕세명 교수가 지능형 차량 설계실을 설립하였다. 이후 2000년에 지능형 시스템 설계실로 명칭을 변경하였고, 2001년에는 김상명 교수가, 2002년에는 Sarbu 교수가 합류하였으며 2003년 지금과 같은 명칭으로 변경되었다.

또한, 본 연구실에서는 소음 진동 실험, 측정 및 분석 장비를 보유하고 있다.



(가) 고정자 (나) 회전자
그림 14 새로 개발된 단상 유도모터

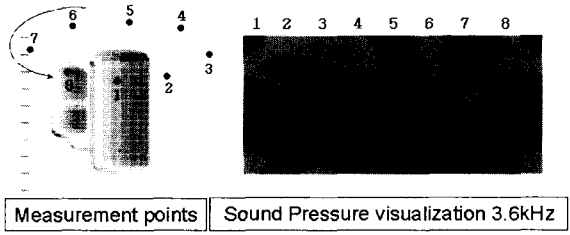


그림 15 음장 가시화 시스템으로 측정된 소음

소음 실험을 위한 3.6×3.6×2.4(m³)의 크기에 20 dB(A)의 압소음을 가지고 있는 완전 무향실과 함께, 20채널 소음 가시화 시스템과 마이크로폰 어레이 및 자동 위치 제어 장치, 그리고 B&K 3551 front end, HP VXI system, HMS III head measurement system 등을 보유하고 있다.



그림 16 무향실 내의 마이크로폰 어레이와 위치 제어장치

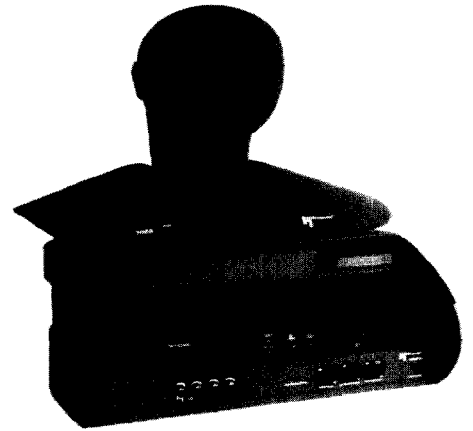


그림 17 HMS III head measurement system

(그림 15~17). 또한, 소음진동 해석과 시뮬레이션을 위한 LMS CADA X, MTS sound quality, MTS Ti das, 수치해석과 최적설계를 위한 MSC/NASTRAN, ANSYS, SYSNOISE, FLUX, GENESIS 등의 상용 프로그램을 사용하고 있다.

4. 연구실적

설계 및 음향제어 연구실이 생긴 이래로 국제학술지인 Journal of Sound and Vibration, IEEE Transaction on Magnetics, AIAA 등에 20여 편의 논문을 게재하였다. 또한, ICSV(international congress of sound and vibration), VANEM

(vibration and acoustic noise of electric machinery), AIAA MA&O, WCSMO, IEEE CEFC, Compumag 등의 국제학술대회와 한국소음진동공학회, 대한기계학회, 한국자동차공학회, 대한전기학회 등에 100여 편의 논문을 발표하는 등 활발하게 참여하고 있다.

5. 맺음 말

설계 및 음향제어 연구실은 기존의 연구를 확장하여 virtual 3D sound, psycho acoustics, 생체 음향 제어 및 신호처리 등의 연구를 수행할 계획이다.



그림 18 연구실 인원과 김상명, 왕세명, Mircea Sarbu 교수