

# 음향 및 진동 연구실

강 연 준\*

(서울대학교 기계항공공학부)

## 1. 머리말

우리 실험실에서는 차세대 자동차 연구관의 최신 시설 및 연구장비를 활용하여 자동차 소음·진동 분야 및 음향 재료 분야에 대하여 활발한 연구를 수행하고 있으며, 실험 및 해석을 수행함에 있어서 다양하고 새로운 기술을 적용하기 위해 노력하고 있다.

서울대학교 음향 및 진동 연구실(acoustics and vibration laboratory)은 1997년 3월에 개설된 이후 박사 1명과 석사 17명을 배출하였으며, 현재는 박사과정 5명과 석사과정 9명의 학생이 재학 중이다. 1997년부터 2004년 까지 자동차 및 가전제품 등 여러 산업분야의 소음 진동 문제를 폭넓게 다루었으며, 2004년 6월 차세대 자동차 연구관이 설립된 이후 연구관내의 시설 및 설비를 적극 활용하여 자동차 분야의 NVH 연구에 주력하고 있다. 또한 하이브리드 및 전기 자동차 등 차세대 자동차의 다양한 동력전달 시스템에 대한 NVH 성능 개선 및 최적화를 효율적으로 수행할 수 있는 기반기술 구축에 힘쓰고 있다.

이 글에서는 서울대학교 음향 및 진동 연구실(<http://acustica.snu.ac.kr>)에서 연구 하고 있는 분야에 대한 설명과 함께, 실험실 보유 시설과 장비에 대한 간략한 설명을 하고자 한다.

## 2. 연구 분야

### 2.1 주요 연구과제

우리 연구실에서 현재 수행하고 있는 주 연구 분야들은 다음과 같다.

- 음향 재료(acoustic materials)의 음향학적 성능, 물성 평가 및 최적화 연구

\*E-Mail : yeonjune@snu.ac.kr

⇒ ⇒ ⇒ 국내연구실 소개

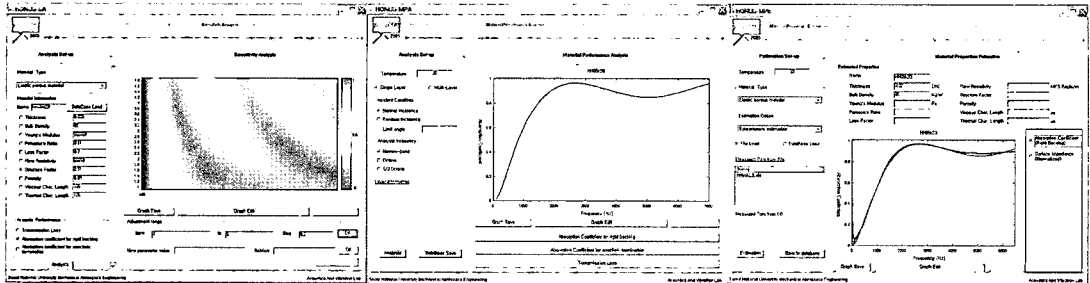


그림 1 음향 재료 물성 추정 및 성능 예측 소프트웨어

- 통계적 에너지 기법을 이용한 음향재료 특성연구
- 전달 함수 합성 기술 및 연결부 특성 규명을 통한 부분 구조 합성법
- 실차 입력점 강성 정량화 기법 개발 및 최적화 연구
- 빔포밍 및 홀로그래피 기술을 이용한 음장 가시화 연구

#### (1) 음향 재료 물성 추정 및 음향학적 성능 예측

음향 재료는 1 kHz 이상의 중고주파 소음을 제어하는데 효과적이며, 주로 공기 전달 소음을 제어하기 위하여 사용된다. 특히, 음향재료는 자동차의 경량화 및 소음저감 등의 설계관점에서 중요한 항목으로서 음향재료의 선정과 그 부착위치의 선정 시에 각각의 재료에 대한 데이터 베이스를 기반으로 시뮬레이션 기법을 이용할 경우 설계시간 단축 및 최적화를 효율적으로 이룰 수 있다. 이러한 시뮬레이션 기법을 이용하기 위해서는 많게는 7개의 음향 재료 물성 값이 필요하고, 원칙적으로 모두 측정 가능하지만 실험을 통하여 그 물성 값을 측정하는 것은 많은 시간과 노력이 요구되며 경우에 따라서는 그 정확성 또한 높지 않을 수 있다. 따라서 유동저항 계수 등과 같이 측정이 비교적 용이한 물성과 수직

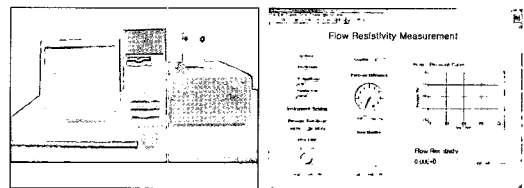


그림 2 유동 저항계수 측정 장치 및 소프트웨어

입사 흡음률(또는 반사계수)의 측정값을 이용하여 나머지 필요한 물성 값을 추정하는 방법이 보편적으로 사용되고 있다. 우리 실험실에서는 음향재료의 물성을 이론적인 방법을 통하여 추정하는 알고리즘을 개발하고 음향재료의 물성 추정, 성능 예측 및 데이터 베이스화를 위한 통합 소프트웨어 개발(그림 1)에 대한 연구를 활발히 수행하고 있다. 또한 비교적 쉽고 정확하게 측정 가능한 유동저항 계수 측정시스템을 개발(그림 2)하여 완성차 업체 및 관련 소재 업체에 제공함으로써 측정방법 표준화 및 재료 개발에 기여하고 있다.

#### (2) SEA를 이용한 음향재료의 음향학적 성능 예측에 관한 연구

통계적 에너지기법(statistical energy analysis, SEA)은 소음·진동 문제를 예측하기 위하여 1960년대

개발되었던 소음진동 해석 기법 중 하나이다.

최근 SEA방법에 의한 소음·진동 해석은 빠른 해석시간과 광범위한 해석주파수 영역으로 인하여 그 사용이 급속도로 확산되고 있으며, 획기적으로 발전되었다. 우리 실험실에서 연구하고 있는 음향재료의 SEA는 일반적인 다공성 탄성재료(poro-elastic), 다중 층 재료(multi-layered materials) 등 다양한 재료의 음향 특성을 얻기 위한 방법으로 사용하고 있다. 음향재료에 대한 SEA는 일반적으로 자동차의 대시패널에 장착되는 폼과 섬유재료에 대한 해석을 주로 한다. 일반적인 해석기법으로 유한요소 해석(finite element method, FEM)은 저 주파수영역에 대해서 해석이 용이하나 중고주파수대역까지 실험과 해석을 일치시키기에는 한계가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 음향재료의 FEM과 더불어 power

flow analysis (그림 3) 혹은 SEA기법을 이용하여 중고주파수 대역에 대한 음향재료의 음향학적 성능 예측에 대한 연구가 진행 중이다.

(3) 하이브리드 CAE/CAT 기술을 이용한 차실 내 소음 저감

자동차 NVH성능 향상을 위하여 실차 해석 방법 및 기술의 진보적인 발전이 이루어졌다. 그러나 차량과 같은 복잡한 구조물들은 모델링의 어려움과 함께 전체 구조물의 정확한 동특성을 해석하기는 쉬운 일이 아니다. 그러나 간단한 구조물의 동특성은 수식화 하기에 용이하며 더욱 정확하게 유한요소법에 의한 해석이 가능하므로 동적 비연성된 부분 구조의 모델을 사용하여 복잡한 구조물의 동특성 예측에 활용이 가능하다. 복잡한 구조물의 동특성을 간단한 부분 구조들로 나누어 해석한 후 종합하여 전체 시스템의 동특성을 예측하는 것을 부분구조 합성법이라 한다. 이러한 연구들 중 "주파수 응답함수 합성법(FRF based substructuring, FBS)"은 선형 시스템의 응답을 예측하기에 보다 편리하고 정확한 방법으로 알려져 있다. 하이브리드 CAE/CAT 예측 기술(그림 4)은 이러한 주파수응답 함수 합성

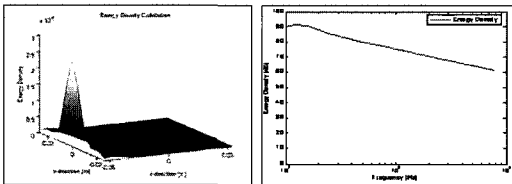


그림 3 폼의 에너지 밀도 및 에너지 밀도 분포 예측값

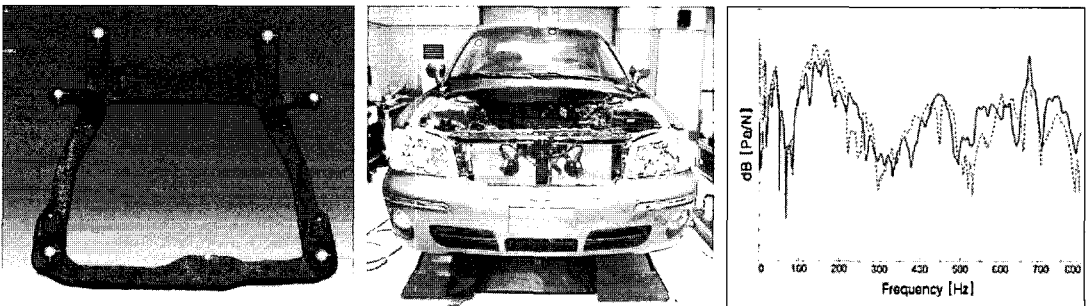


그림 4 하이브리드 FBS 부분 구조물 및 합성 결과 그래프

⇒ ⇒ ⇒ 국내연구실 소개

기술을 도입하여 유한요소해석 결과와 실험적 결과를 이론적으로 융합하여 전체 구조물의 응답을 가상적으로 구현한 기술이며 그 신뢰성 또한 매우 높아 이에 대한 연구를 활발히 수행 중이다.

(4) 실차 입력점 강성 정량화 기법 개발 및 최적화  
자동차 엔진이나 노면에 의해서 에너지가 전달되는 차체 및 마운팅 부의 진동을 줄이기 위하여 전달되는 힘의 정량적인 양에 대한 최적의 강성값(그림 5)이 필요하지만, 업계에서는 그 정량화의 기준이 모호하다. 이러한 표준을 제시하기 위해 입력점 강성 측정의 표준화된 방법이 필요하며, 측정 위치에 대한 연구도 필요하다. 일반적으로 입력점 강성 값의 표현은 힘에 대한 속도의 비를 나타내는 모빌리티 혹은 힘에 대한 가속도의 비를 나타내는 이너턴스로 나타낸다. 이러한 모빌리티나 이너턴스 값은 주파수에 대한 함수이며, 업계에서는 1자유도계의 이상적인 강성 값을 비교기준으로 제시하고 있어서 차체와 같은 복잡한 구조물의 입력점 강성값 정량화에 어려움이 있다. 차량 구조물에서 엔진이나 노면으로부터 전달되는 힘은 엔진 마운트, 트랜스미션 마운트, 서스펜션 등 각 경로마다 그 기여도가 다르기 때문에 그 정량적 양의 예측 및 정확한 측정이 필요하며, 그에 대한 적절한 강성 기준이 절실히 필요한 실정이다. 또한 다양한 차량의 진동 전달 경로에 따른 힘의 기여도와 입력점 강성 측정위치에 따른 기준이 없기에 각 차량에 대한 강성 값의 기준이 동일하며 그로 인해 차체의 각 부에 요구되는 강성 값이 초과 되거나 미달되는 현상이 발생한다. 이로 인해 차체에 원치 않은 진동 및 소음을 유발시킬 수 있으며 중량 증가에 따른 여러 부정적 요소가 발생할 수 있으므로 이에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

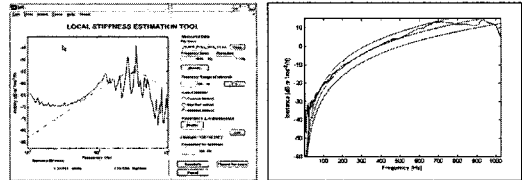


그림 5 입력점 강성 정량화 프로그램 및 입력점 강성 그래프

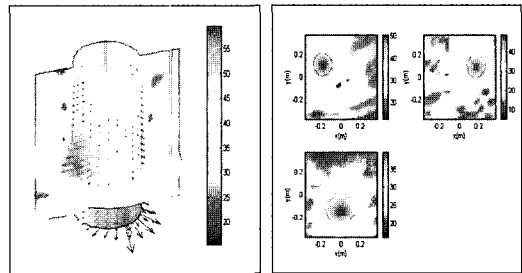


그림 6 원통 좌표계 홀로그래피 그림 7 빔형성 방법에 의한 음장 분리

(5) 음향 홀로그래피를 이용한 음장 가시화

음향 홀로그래피(그림 6)는 음원에서 가까운 거리의 2차원 면(hologram)상의 음압 분포로부터 3차원 상의 음장 특성을 알아내는 방법이다. 음원면에서 가까운 거리의 2차원 면(홀로그램)상에서 측정된 음압분포나 그 면에 수직한 방향의 속도분포를 측정하여 공간상의 모든 점들에서의 음압분포를 재구성할 수 있으며, 입자 속도벡터, 인텐시티 벡터, 방사패턴, 총 음향 파워 같은 여러 음향학적 변수들을 계산할 수가 있다. 이를 통하여 실제 소음원의 위치를 찾을 수 있으며, 그 특성을 분석하여 소음을 제어하는데 매우 유용한 기술이다.

실제로 홀로그램면상의 음압 분포를 측정하기 위해서는 많은 마이크로폰과 분석 채널이 필요하므로 현실적으로 한계가 있다. 그래서 소수의 마이크로폰으로 이동하면서 측정된 후 고정된 위치에 설치

된 기준마이크로폰을 통하여 동시에 측정된 효과를 얻게 되는데, 상관성이 없는 다수의 음원들로 음장이 이루어져 있을 경우에는 각각의 상관성이 없는 음장들로 재구성 한 후 홀로그래피 과정을 적용하여야 한다. 우리 실험실에서는 빔포밍을 이용하여 부분음장을 재구성(그림 7)하는 알고리즘개발에 대한 연구를 수행 중이다.

### 3. 연구실 소개

우리 실험실은 현대기아자동차에서 차세대 자동차 분야의 연구와 인력양성을 위해 기증한 총 2200평의 지하 1층 지상 5층의 차세대 자동차 연구관(그림 8)에 위치하고 있다. 이 연구관내에 NVH 연구를 위한 실차 반무향실, 잔향실 및 차량 시험실이 있으며 사시 동력계 및 실차 진동모드 시험용 정반이 갖추어져 있다.

#### 3.1 보유 시설



그림 8 현대기아자동차연구관 전경

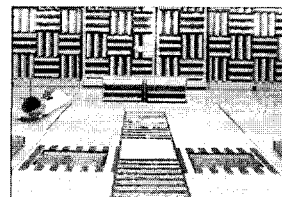


그림 10 사시 동력계

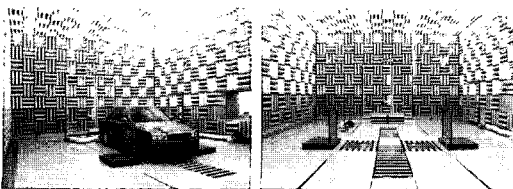


그림 9 실차 반무향실 내부 모습

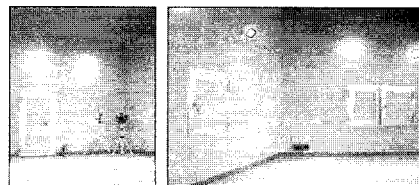


그림 11 잔향실 내부 모습

#### (1) 실차 반무향실

##### ■ 사양

□ 유효 치수 : 13.8 m × 9 m × 5 m

□ 컷오프 주파수 : 80Hz

□ 흡음 췌지 : Glass wool (32 kg/m<sup>3</sup>, 100 mm) 600 mm × 600 mm × 850 mm

##### ■ 성능

□ 암소음 : 16.8 dBA 이하(전설비정지시)

23.3 dBA 이하(공조가동시)

31.5 dBA 이하(공조배기가스 배출 FAN 가동시)

□ 차음 성능 : 68 dB/500 Hz - 차량 출입문, 75 dB/500 Hz - 출입문

□ 자유음장 조건 : 80 Hz 이상에서 ISO-3745 만족함

#### (2) 사시 동력계

##### ■ 사양

□ 제어 요소 : 속도, 토크, 로드 시뮬레이션

□ 최대속도 : 200 km/h

⇒ ⇒ ⇒ 국내연구실 소개

- 동력 흡수 범위 : 0~300 HP
- 적용 차량
- 종류 : 2륜 구동 승용차 및 소형 버스
- 무게 : 500~3000 kg

### (3) 잔향실

- 사양
- 표면적 : 237.35 m<sup>2</sup>
- 부피 : 240.78 m<sup>3</sup>
- 컷오프 주파수 : 100 Hz
- 외벽 두께 : 300 mm (노출 콘크리트 마감)
- 성능
- 압소음 : 25.6 dB(전 설비 정지시)  
34.8 dB(공조배기가스배출 FAN 가동시)
- 차음성능 : 40 dB / 500 Hz(차량 출입문), 43 dB / 500 Hz(출입문)

### (4) 차량 시험실

- 사양
- 유효치수 : 10.05 m × 10.31 m × 4.82 m
- 마감 : GLASS WOOL 흡음재(24 kg/m<sup>3</sup>, 100 mm), CLOTH 마감
- 성능
- 압소음 : 21.3 dBA 이하(전 설비 정지시)

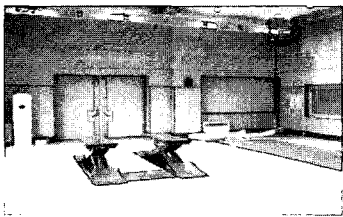


그림 12 차량 시험실 내부 모습

33.8 dBA 이하(공조배기가스 배출 FAN 가동시)

- 차음성능 : 42 dB/500 Hz(차량 출입문), 45 dB/500 Hz(출입문)

### ■ 설비

- X-Y 호이스트 : 최대 하중 2 Ton
- 주물장반 : 5200 mm × 1900 mm
- 차량 리프트 : 용량 3 Ton

### 3.2 보유 장비

우리 실험실은 소음·진동의 효율적 측정 및 분석을 위해 다음과 같은 다양한 장비를 보유하고 있다.

#### ○ 진동측정 장비 및 센서

- Accelerometer(triaxial : 24개, uni-axial : 9개)
- Force transducer : 2개
- Impact hammer : 3개
- Calibrator : 1개
- Mini shaker : 1개
- Tacho meter : 1개
- Vibration isolation table : 1대
- Laser scanning vibrometer : 1대
- ICP signal conditioner : 3대
- Amplifier(Nexus) : 4대
- Patch panel : 2대

#### ○ 음향 측정 장비 및 센서

- 1/2" Microphone : 14개
- 1/4" Microphone : 20개
- 1/4" Array microphone : 28개
- Probe microphone : 1개
- Intensity microphone pair : 1개
- Calibrator : 2개
- Omni-directional sound source : 1개
- Rotating booming microphone : 1개

국내연구실 소개 <>

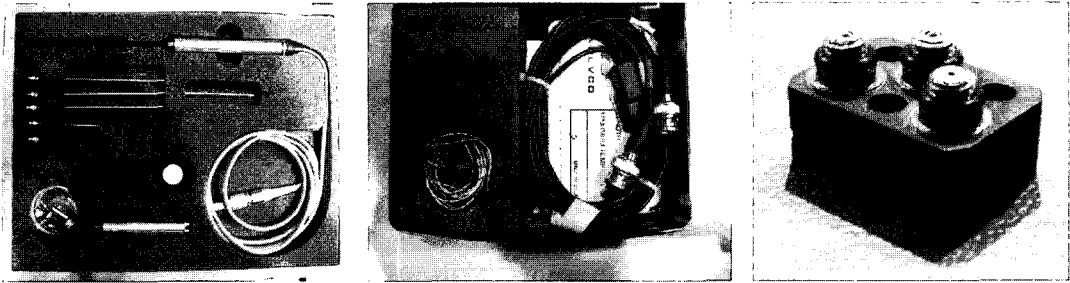


그림 13 각종 센서류




그림 14 각종 측정 장비 및 분석 장비

- Impedance tube : 1대
- Volume velocity source : 2대
- Acoustic exciter : 2개
- Amplifier : 2대
- Amplifier(Nexus) : 2대
- Sound level meter : 1대
- Flow resistance measurement system : 1대
- 분석 장비
  - Pulse analyzer(17ch) : 1대
  - Pulse software
  - SCADAS-III (32ch : 1대, 56ch : 1대)
  - HP analyzer (4ch:1대, 2ch:1대)
  - Test.Lab

- Cada-X
- Virtual.Lab
- Auto-SEA2

#### 4. 맺음말

이상에서 본 바와 같이 우리 실험실에서는 차세대 자동차 연구관의 최신 시설 및 연구장비를 활용하여 자동차의 소음·진동 분야 및 음향 재료 분야에 대하여 활발한 연구를 수행하고 있으며, 실험 및 해석을 수행함에 있어서 다양하고 새로운 기술을 적용하기 위해 노력하고 있다. 

[기획 - 나성수 편집위원 : nass@korea.ac.kr]