

음장 가시화 (3차원 음장), 능동 소음 제어 (정숙 공간, 소리공), 구조 음향 (연성효과), Duct and Resonators, Time-Frequency Analysis

김 양한

한국과학 기술원, 기계공학과, 소음·진동 제어 연구 센터

전화: 042-869-3025

FAX: 042-869-8220

E-mail: yhkim@sorak.kaist.ac.kr

WWW: <http://novic.kaist.ac.kr/yhklab>

1. 현재 수행 중인 연구

능동 소음 제어 분야

능동소음제어는 기존의 수동적인 방법을 이용한 소음제어 방법을 사용할 수 없는 경우, 제어음원을 이용하여 소음원에 의한 소음과 반대되는 위상과 크기를 발생하도록 제어음원을 구동하여, 소음감소를 원하는 정숙공간(zone of quiet)에서 소음원에 의한 소음과 제어음원에 의한 제어음이 서로 소멸간섭을 이루도록 제어하는 것이라고 말할 수 있다. 이러한 능동소음제어는 그 기본적인 개념이 1934년 독일의 P. Lueg에 의해 미국특허로 등록된 이후 상당기간동안 실제화 과정에서 어려움이 있었으나, 1980년대 들어서 능동소음제어기의 핵심부품인 디지털 신호처리칩의 개발이 가속화되고, 디지털신호처리 기술의 발전에 힘입어 급격히 활성화 되었다. 현재 자동차, 항공기 및 각종 공조덕트 등을 대상으로 한 능동소음 제어기술의 적용이 활발히 진행되고 있는 추세이다.

현재 우리실험실에서 연구된 주요 연구내용은 다음과 같다.

1. 덕트 내부의 고차모우드 수보다 적은 수의 제어음원과 마이크로폰을 이용한 덕트 방사소음 제어에 관한 연구

덕트의 지름이 소음의 파장에 비해서 상대적으로 큰 경우에는 덕트 내부에 고차모우드 소음성분들이 전파하게 되며, 이러한 소음성분들이 외부로 방사된다. 이러한 소음을 줄이기 위한 방법으로 덕트 내부 고차모우드 갯수에 해당하는 제어음원과 센서를 이용하여 덕트 내부소음을 모우드별로 감지하고 제어하는 방법을 생각할 수 있다. 이 경우 고차모우드의 갯수가 증가할수록 필요한 제어음원과 센서의 수가 증가하므로 제어기의 구성이 복잡해지고 가격이 증가하는 단점이 있다.

다른 측면에서 생각해 보면 주어진 갯수의 제어음원과 센서를 어떠한 위치에 설치하면 가장 효과적으로 음향 방사 파워를 제어할 수 있을까하는 생각을 할 수 있다. 본 연구에서는 덕트 내부를 전파하는 고차모우드 수 보다 적은 갯수의 제어음원과 마이크로폰을 사용하여 오차 마이크로폰 위치에서의 음향 포텐셜 에너지를 최소화하는 제어시스템을 구성한 경우, 음장 변수와 제어시스템 변수 변화에 대한 제어시스템의 음향 방사 파워 제어성능에 대한 연구를 수행하고 있다.

- 제어후 음향 방사 파워를 음장 변수와 제어시스템 변수들의 함수로 표현
- 음장 변수와 제어시스템 변수 변화에 따른 제어시스템의 제어성능 해석 (발생 가능한 소음원 음장 집합에 대하여 제어후 음향 방사 파워의 평균과 분산, 최대 및 최소값)
- 임의의 소음원 음장에 대해 제어후 음향 방사 파워를 항상 제어전 이하로 제어 할 수 있는 강건한 제어시스템에 대한 연구

2. 음향인텐시티에 기초한 배기소음의 능동제어

- 외부환경으로 방사되는 배기소음의 제어를 위해 외부로 방사되는 소음의 파워와 비례하는 덕트내의 인텐시티를 제어
- 두개의 마이크로폰을 이용하여 배기계하류의 음향인텐시티를 계측함으로써 가관측성 증대

3. 음향파위에 기초한 실내 광역소음의 제어

- 실내공간 전체의 포텐셜에너지를 제어목적으로 한다.
- 특정위치에 다수의 마이크로폰을 설치하지 않는다.
- 기준신호(reference signal)와 제어스피커의 음향방사량 계측만으로 제어를 수행

이동 프레임 방법(Moving Frame Acoustic Holograph)

음장을 가시화 하는 여러 방법 중 음향 홀로그래피 방법은 인텐시티 방법등에 비해 한 평면에서의 음장(홀로그래프)의 측정을 통해 임의의 평면에서의 음향학적 물리량을 얻을 수 있는 방법으로 홀로그래프의 측정에 있어 많은 투자가 요구되어왔다. 이러한 단점을 개선하기 위하여 많은 연구가 진행되어왔는데 예를들면 STSF방법등이 그 좋은 예라 할 수있다. 이 방법은 기존 마이크로폰들과 선형 마이크로폰 어레이를 이용하여 순차적으로 홀로그래프를 측정하는 방법인데, 정상상태 음장을 측정하는데는 매우 좋은 방법이나 이동 음원에 의한 음장을 측정하지 못하며, 측정에 많은 시간이 요구되는 단점을 가지고 있다. 이동 음원에 의한 음장을 가시화 하는 다른 방법들로서 평면 어레이를 이동 음원에 부착하여 홀로그래프를 측정하는 방법등도 제안 되었으나, 복잡한 실험장비 및 바람에 의한 소음등에 의한 정상외 어려움등을 안고 있다. 본 이동 프레임 방법은 위와 같은 점을 개선하여 홀로그래프를 빠르게 측정할 수 있으며 이동 음원의 가시화에도 적용될 수 있다.

시간-주파수 기법

시간-주파수 분석기법은 신호의 시간과 주파수에 따른 정보를 동시에 나타낼 수 있는 신호처리 기법으로, 시간-주파수 평면상에 신호의 파워분포를 나타낸다. 시간-주파수 분석기법의 예로서는 스펙트로그램(spectrogram), 웨이블렛 변환(wavelet transform), 위그너-빌 분포함수(Wigner-Ville distribution)등을 들 수 있다. 시간, 주파수 영역에서 위그너-빌 분포함수가 갖는 성질들로는 시간 이동과 주파수 변조에 관련된 성질들, 순간 진동수나 그룹 지연과의 관계 등이 있다. 또 하나의 중요한 성질은 위그너-빌 분포함수에의 스므딩과 관련된다. 위그너-빌 분포함수와 2차원 창문함수와의 컨볼루션을 통한 스므딩에 의하여 일반적인 시간-주파수 분석기법을 나타낼 수 있다. 위그너-빌분포함수에의 스므딩은 앰비규이티 함수(ambiguity function)에 커널(kernel)이라고 불리는 2차원 창문함수를 곱함을 의미한다. 해석자의 목적에 따라 다양한 형태의 커널이 존재할 수 있으며, 그에 따라 다양한 형태의 분포함수가 존재한다. 위그너-빌 분포함수는 이중선형(bilinear) 변환으로서, 여러 성분이 결합되어 있는 신호의 경우 혼신성분(cross-talk)을 발생시킨다. 우리는 앰비규이티 함수에 대한 고찰을통하여 혼신 성분을 최소화 할 수 있는 분포함수를 구현하고자 하였다.

앰비규이티 함수 영역에서 실제 성분은 원점을 통과하며 각각의 기울기와 길이를 갖는 선분들의 조합으로 표현된다. 반면에 혼신 성분은 상대적으로 넓게 분포하여 나타난다. 이와 같은 사실을 바탕으로 앰비규이티 함수에서 실제 성분을 유지한 채, 혼신 성분만을 감소시킬 수 있는 창문함수를 제안하였는데, 그것은 '회전 창문함수(rotating window)'라 명명되었다.

구조 음향학 분야

음파는 음원 및 매질에 따라서 크게 고체음(structure-borne sound)과 공기음(air-borne sound)으로 나눌 수 있다. 공기음이란 유체의 흐름이 있는 경우 점성 또는 장애물에 의한 흐름의 변화에 의해서 발생하는 소음으로서 예로 제트 소음(jet noise), 와류 소음(turbulent noise) 등이 있다. 고체음은 외력에 의해 구조물 내에서 생성되는 음을 의미하며 종파(longitudinal wave), 굽힘파(bending wave) 등이 있다. 고체음은 구조물의 진동을 야기함은 물론 구조물과 접해 있는 유체의 운동을 유발하여 방사 음장을 형성하기 때문에 주 소음원으로서 작용하여 소음원 파악 및 소음 제어 등의 관점에서 필연적으로 연구되어야 할 분야다. 우리 실험실에서는 이와 관련하여 다음과 같은 연구가 진행되고 있다.

1) 평판-공동 연성계의 해석

구조물과 유체간의 연성은 크게 일방 연성(one-way coupling)과 완전 연성(full coupling)으로 나누어 볼 수 있다. 일방 연성은 강도가 상대적으로 큰 구조물의 해석을 독립적으로 수행하고 그 결과로부터 전파되는 음장을 예측하는 방법으로서 구조물의 거동이 유체에 전혀 영향을 받지 않는다는 가정하에 이루어진다. 완전 연성은 구조물의 강성이 유체와 큰 차이를 두지 않으며 따라서 두 계 사이에 서로 영향을 주어 동시 해석을 수행하여야 할 때를 의미한다. 음향학에서의 일반 연성은 키르히호프헬름홀츠 방정식으로 대표할 수 있으며 많은 경우에 일방 연성으로 해석하고 있다. 그러나 닫힌 공간 내에서 혹은 수중에서와 같이 유체의 영향을 무시할 수 없을 때에는 완전 연성으로 해석함이 옳다. 완성 연성 문제는 해석상의 어려움이 많아 기초적인 이론이나 저주파의 경우 수치해석에 의존해 왔다. 본 연구에서는 평판-공동 연성계가 자유공간 내에 존재할 때의 거동을 실험을 통해 살펴 보고 물리적인 해석을 시도하고자 한다.

2) 피스톤 슬랩 (piston slap)

자동차 엔진 관련 기계적 소음은 압력의 갑작스런 변화에 의한 폭발 소음 (combustion noise)과 피스톤과 실린더 벽면의 충돌에 의한 피스톤 슬랩으로 크게 구분할 수 있으며 압력이 높지 않고 압력의 변화가 빠르지 않을 경우에는 피스톤 슬랩이 기계적 소음의 주 원인이 된다. 특히 피스톤과 실린더의 열팽창 차이 때문에 간극을 크게 해야 하는 디젤 엔진 (Diesel engine)의 경우 엔진 진동 및 소음의 주 원인이 된다. 이러한 진동/소음을 줄이기 위해서 먼저 피스톤 슬랩에 의한 진동 현상을 예측 하기 위한 이론적 접근 방법과 이의 타당성을 검증하기 위한 실험적 방법을 병행하고 있다. 또한 이론적 해석을 이용해서 진동 저감을 위한 엔진의 설계 방법과 피스톤과 실린더의 간극 진단을 위해 슬랩 신호를 이용하는 방법에 대해 살펴보고 있다.

3) 유체 흐름이 있는 관에서의 유량 측정

대부분의 유량 측정 장치는 직관의 일부를 제거하거나 변형하여 측정장치를 사용해야 하므로 측정 위치를 자유롭게 이동시키지 못하는 단점을 가지고 있다. 또한 많은 유량 측정 장치는 유체와 접촉하는 방식을 취하고 있으므로 유체의 흐름을 방해하게 된다. 이와 같은 단점을 보완하기 위하여 전자기파 또는 초음파를 사용한 방법 등이 이용되고 있으나 상대적으로 비용이 높은 단점이 있다.

이와 같은 단점을 보완하기 위하여 비파괴 방식을 취하며 경제적인 측정 방법에 대한 연구가 요구되고 있다.

본 연구에서는 유량에 따라 변화하는 물리량을 간접적으로 측정함으로써 유량 측정을 시도하고 있다. 즉 유속에 따라 변화하는 직관의 동적 특성주파수의 변화, 도플러 효과-을 가속도계를 이용하여 측정한 후 유량을 예측한다. 이를 위하여 기존에 제안된 유체가 흐르는 직관에 대한 수학적 모델을 이용하여 유체 속도와 파수 변화 사이의 정량적 관계를 유도하고있으며 파동 분리 이론을 근간으로 유도된 파수 변화 측정 방법을 이용하고 있다.

4) 덕트 내의 저주파 소음 저감

건물내의 환기계 등은 덕트의 연속으로 이루어져 있으며 건물내의 소음의 주원인이 되기도 한다. 소음 저감을 위해서 능동 소음제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나 비용이 많이 든다는 단점이 있으며 흡음재를 이용하여 소음을 줄이는 방법도 사용될 수 있으나 저주파영역에서는 소음 저감을 하기 어려우며 유체의 흐름에 의해 쉽게 마모가 생기는 문제가 발생한다. 본 연구는 덕트의 한쪽면을 박막으로 구성하여 저주파 에서 소음을 저감시키는 방법을 진행하고 있으며 박막의 면밀도나 장력에 따른 특성을 살펴본다.

덕트 음향학

덕트음향학은 음향학의 기초적인 분야로, 덕트내의 음파전파특성을 연구하여 이를 활용하거나 소음전파를 줄이는데 목적을 둔다. 주로 내연기관의 흡-배기구나 소음이 심한 공조시스템 등에 있어, 소음의 전달과 방사를 억제하기위한 소음기의 개발이나 각종 음향요소의 내부음장해석을 주로 하고있다.

1. 소음기의 해석

일반승용차나 트럭과 같은 중장비에 장착되는 여러가지 소음기의 음향학적 성능을 실험 및 모의실험을 통해 평가한다. 주로 투과손실과 삼입손실을 근거로 소음기의 성능을 파악할 수 있다. 복잡한 내부구조를 갖는 소음기의 경우 전달행렬법을 사용하여 단순화시켜 해석할 수 있다.

2. 각종 음향요소의 내부음장해석

(1) 단순확장관의 해석

단순 원형확장관에 있어서, 입력단과 출력단이 임의의 위치에 있을 경우 (원통면/원통면, 측면/원통면, 측면/측면..)의 내부음장을 일반적으로 해석하였다. 그린함수와 모드확장법을 이용한 3차원 음장해석이 이루어졌으며, 투과손실을 통해 확장관의 소음저감성능을 알아보았다.

이경우 입-출력단의 위치가 투과손실에 큰 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

(2) 다공관의 해석

소음기를 구성하는 요소중 하나인, 다공관의 음향학적 특성을 실험을 통해 알아보았다. 이때 무차원 파수와 상대어드미턴스가 균일 및 비균일 공극분포를 갖는 다공관의 음향학적 특성을 대표하는 물리적 인자임을 확인하였다. 투과손실을 통해 다공관의 특성을 살펴보았으며, 공극분포에 따른 영향이 크게 나타남을 알 수 있다.

(3) 공명기의 해석

공명기는 주로 순음이나 좁은 주파수폭을 갖는 소음의 제거를 위해 널리 사용되는 음향요소이다. 그린함수를 이용한 3차원 음장해석을 통해 공명기의 형상에 따른 내부음장 변화를 알아보았다. 일반적으로 공명주파수는 공명기의 부피와 천공의 크기에 의해 결정된다고 알려져있다. 그러나, 공명기의 형상이나 천공의 위치에 따라 천공에서의 부가질량 효과에 의해 공명주파수가 변함을 이론과 실험을 통해 확인하였다.

(4) 음향스크린의 해석

사각덕트내에 장착된 음향스크린의 소음저감특성을 실험으로 확인하였다. 덕트내에 음향스크린을 삽입함으로써 음파전파경로가 두 부분으로 나뉘지게 되고, 이때 음파경로의 비대칭성으로 인해 특정주파수에서 공명기와 같이 좁은 주파수폭을 갖는 소음저감특성이 있음이 밝혀졌다. 그리고, 고차 음향모드를 고려한 해석을 통해 이러한 현상을 수학적으로 확인하였다.