

# 차실 음향 최적 설계에 관한 연구

## Optimal Design of Acoustical Characteristics of Passenger Compartment

김정수\*·강연준\*\*

Jung Soo Kim and Yeon June Kang

**Key Words :** Reflection Plane, Ray Tracing Method, Acoustic Mode, Acoustic Material..

### ABSTRACT

This study is to make the fundamentals of sound quality evaluation in regard of acoustical characteristics of passenger compartment. The deviation of frequency response function level within audible frequency is evaluated at receiving point in the research of room acoustics. In this study, frequency response function is the one between speaker and driver's ear positions. The positions of driver and audio speakers are optimized by analysis of acoustic mode of acoustic cavity. The main reflection planes are determined by analysis sound ray path diffused at optimized speaker positions. Finally, designer selects acoustical material by analysis of absorption effect of acoustical materials on the main reflection planes in order to avoid to distortion and fluctuation of frequency response function..

### 1. 서 론

본 연구의 목적은 차실을 모델링하고 진동과 음향사이의 연성을 해석하여 차실의 소음 저감 문제를 최우선으로 다루는 기존의 방법과는 달리 차실을 진동과 상관없는 독립된 공간으로 모델링하고 순수하게 음향학적으로 접근하여 차실의 음향 특성을 분석함으로써 설계단계에서 음질(sound quality) 평가를 할 수 있는 기초를 마련하는 것이다. 복잡한 재료로 구성된 실제 차량에서 차실의 음장을 해석하기 위한 기본 해석 기술을 개발하기에 앞서 개발 비용의 절감을 위해서 간단한 자동차 모형의 음향학적인 특성을 분석이 이루어져야 한다. 그리고 이 축소 모델은 음향학적으로 간단하다고 가정할 수 있는 충분한 두께의 아크릴로 1/2 스케일의 자동차 실내 모형을 제작하였고, 축소 모델의 실내음향 특성을 분석한 결과는 실차 적용 가능 여부에 대한 판단에 이용하였다. 그리고 실험과 시뮬레이션을 비교 검증한 후, 실제 차실 내부의 각종 흡음재의 특성을 파악 및 예측하여 얻어진 데이터는 시뮬레이션을 통한 주파수 응답함수 예측에 이용하였다. 일반적으로 실내 음향에 관한 연구에 있어서 특정 수음점에서 주파수

응답 함수는 전 주파수 대역에서 차실에 분포하는 음의 고른 정도를 파악하고 음의 왜곡이 생기지 않게 하여 운전자가 좋은 음을 들을 수 있도록 만드는 것이며, 본 연구에서는 스피커에 대한 운전자 귀 위치에 설치된 마이크로 폰에 대한 주파수 응답함수를 이용하여 음의 왜곡을 판단한다.

### 2. 자동차 실내음향

#### 2.1 자동차 실내 음향

일반적으로 실내음향 연구에 있어서 청취자 위치에서 전 주파수 영역에 대한 주파수 응답의 분포가 청취자가 듣는 음의 고른 정도를 평가하는데 이용된다. 따라서 자동차 실내 공간에서도 음질에 대한 음향 평가 파라미터를 측정 분석하기에 앞서 공간 내에서 주파수 응답의 측정 분석이 요구된다. 본 연구에서는 실제 자동차의 실내 음향을 하기위해서는 우선 12mm 패넬로 제작된 1/2 스케일 자동차 모형을 이용하여 스피커에 대한 운전자 위치에서 주파수 응답 함수와 음향모드를 측정 분석하고, 실내음향 예측 프로그램인 Raynoise 3.1 을 통하여 주파수 응답함수를 예측 하였고, Sysnoise 5.5 를 이용하여 음향 모드를 예측하였다. 일반적으로 주파수 응답함수와 음향 모드 분석은 차실 소음 개선을 위해서 이용하는 파라미터들이다. 자동차 차실 내의 소음개선 측면에서는 공간의 공진 주파수가

\* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

E-mail : single77@snu.ac.kr  
Tel : (02) 880-1692, Fax : (02) 888-5950

\*\* 서울대학교 기계항공공학부

소음원의 주파수와 일치하지 않도록 만드는 것이 소음원을 줄이는 방법이지만, 실제 음향학 관점에서 주파수 응답함수는 주파수 응답의 기복(평평한 정도)을 보는 것이 목적이고, 음향 모드는 마디평면의 위치를 보는 것이 목적이다.

### 3. 음향 모드

#### 3.1 실내음향 관점에서 음향모드

일반적으로 콘서트 홀, 홈시어터를 구성하는 음향 공간 내에서 음향학적 설계, 스피커 배치 및 청취자 위치 선정을 위해서는 음향 모드 분석이 이루어져야 한다. 특히 거실, 영화관과 같은 좁은 공간에서는 음향 모드의 중요성이 더욱 크다. 청취자의 위치는 널(Null)이 생기지 않는 곳에 있어야 하고, 스피커의 위치는 마디평면(Nodal Plane)이 발생하지 않는 곳에 배치되어야 스피커의 성능을 최대화 할 수 있고, 주파수 대역에서 음을 고르게 전달 할 수 있다. 자동차와 같은 좁은 공간 내에서 음악을 감상하는 운전자의 위치를 변경하는 것은 극히 제한 되어 있다. 하지만, 스피커의 위치는 변화 시키기에 용이하므로 음향 모드 분석을 통하여 스피커 위치를 최적화 할 수 있다.

##### 3.1.1 음향 모드 해석

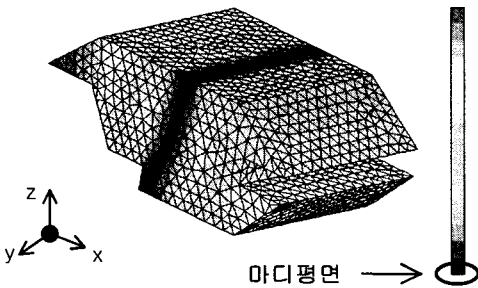


Fig. 1 Acoustic Mode

음향 공간에서 스피커의 위치를 결정하기 위해서 Fig. 2 에서 보는 바와 같이 실험을 통하여 1/2 스케일 자동차 모형에 대한 공간의 주파수 응답 함수를 통하여 음향 모드를 분석하였고, 표 1 에서는 Sysnoise 5.5 를 이용한 FEM 으로 분석한 결과와 실험을 통하여 얻어진 결과를 비교 하였다. 이러한 음향 모드 분석을 통하여 스피커 위치를 결정한다. 자동차 공간에 창작된 여러 종류의 스피

커는 모드의 영향을 받지 않는 첫번째 모드가 발생하는 주파수보다 적은 주파수 대역의 음을 방사하는 우퍼 스피커, 중·저주파수대역의 음을 방사하는 스피커 그리고 고주파 대역의 음을 방사하는 트위터로 구분 되며, 이러한 스피커들은 음향 모드를 이용하여 위치를 최적화 하게 된다. 우퍼 스피커는 주로 첫번째 모드 이하의 음을 방사하므로 어느 곳에 위치하더라도 음향 공간에서 운전자에서 잘 전달할 수 있고, 중·저주파수 대역의 음을 방사하는 스피커는 공간 음향 모드에 많은 영향을 미치므로 특히 마디평면 위에 가진점이 놓인다면 음향 방사에 있어서 충분한 가진력을 가지지 못하므로 마디평면을 피해서 배치 해야 하고, 트위터는 음향 모드의 영향 보다 음향 재료의 흡음률에 영향을 미치므로 고주파에서 흡음률이 높은 음향 재료의 영향을 최소화할 수 있는 수음점에 근접한 곳에 배치한다.

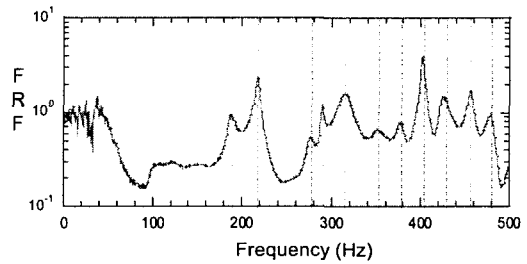


Fig. 2 Measurement of Frequency Response Function

표. 1 Acoustic Mode

	Natural Frequency [Hz]		Mode Shape (x, y, z)
	FEM	실험	
1	172	187	1, 0, 0
2	214	217	0, 1, 0
3	275	276	1, 1, 0
4	288	290	0, 0, 1
5	303	310	2, 0, 0
6	359	355	0, 1, 1
7	371	375	2, 1, 0
8	400	401	1, 0, 1
9	420	422	2, 0, 1
10	428	426	0, 2, 0
11	453	456	1, 1, 1

##### 3.1.2 음향 모드를 고려한 스피커의 위치

Fig. 3 과 Fig. 4 에서 보는 바와 같이 음향 공간

에는 마디평면이 존재하게 된다. 일반적으로 자동차의 후방스피커는 트렁크 패키지 트레이, 전방스피커는 앞문 하부에 설치되어 있다 Fig. 3 과 Fig. 4 에서 일반 승용차들은 마디선이 존재하는 부분에 대부분의 스피커가 장착되어 있는 것을 알 수

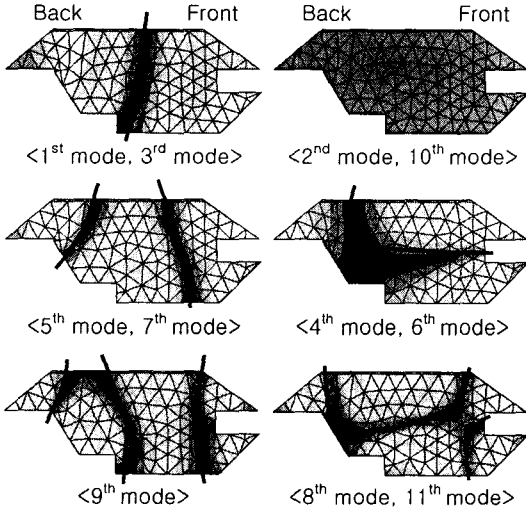


Fig. 3 Acoustic Mode of 1/2 Scale Car Model (Side)

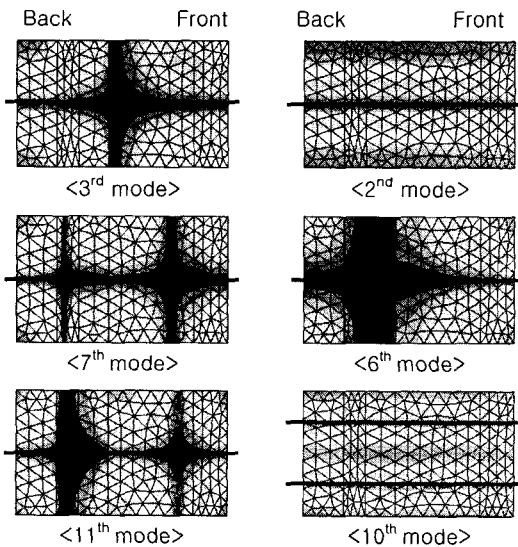


Fig. 4 Acoustics Mode of 1/2 Scale Car Model (Bottom)

있고, 음향 모드를 고려하여 스피커의 방사되는 음의 효율을 높이고 음을 고르게 전달하려면 마디평면을 피해서 스피커를 설치해야 하고, Fig. 3 과 Fig. 4 에서와 같이 전방 스피커는 대시 패널 양끝

위, 후방 스피커는 패키지 트레이 양끝에 설치를 한다면 앞의 조건을 만족시킬 수 있는 최적화된 스피커의 위치를 선정 할 수 있다.

## 4. 음선 추적

### 4.1 음선 추적을 이용한 주반사면 결정

음을 입자로 가정하면 음원은 무수히 많은 음선을 형성한다. 음원으로부터 나온 음선은 각각 균일한 분포를 가지고 음원으로부터 진행하면서 매질의 감쇠계수와 벽면의 특성에 따라 에너지와 진행 방향이 바뀌게 된다. 본 연구에서는 음선의 특정 부위에 집중하는 현상을 발견하고 집중하는 벽면을 주반사면이라 하고, 스피커의 위치에 따라 주반사면의 수와 면적의 변화를 확인한다.

#### 4.1.1 기존의 모델에 대한 주반사면

앞문 아래 부분에 위치한 전방 스피커에 대한 주반사면은 Fig. 5 에서 보는 바와 같이 좌석과 천장 앞부분이다. 트렁크 트레이 후방 좌석 뒷부분에 위치한 후방 스피커에 대한 주반사면은 Fig. 5 에서 나타나듯이 천장 뒷부분에 고루 퍼지게 된다.

#### 4.1.2 새로운 스피커 위치에 대한 주반사면 변화

음향 모드를 고려한 후 새로운 스피커 위치를 적용한 후 주반사면을 분석해 보면, 대시부 양끝에 위치한 전방 스피커에 대한 주반사면의 경우 천장 전방의 넓은 면적에 분포하게 된다. 후방 트렁크 트레이 양끝의 후방 스피커에 대한 주반사면의 경우 천장 후방에 위치한다.

#### 4.1.3 주반사면의 비교

음향 모드를 고려한 후 마디평면을 피해서 스피커를 배치할 경우(Fig. 5 와 Fig. 6), 전방 스피커의 경우는 기존의 모델인 경우 좌석과 천장 앞부분이 주반사면이지만, 음향 모드를 고려한 후의 주반사면은 천장 앞 부분이 된다. 결국, 주 반사면의 수가 감소하고 주반사면의 전체 적인 면적이 감소하고, 후방 스피커의 경우 주반사면의 면적이 감소하게 된다. 주 반사면의 수와 면적의 변화는 흡음면적을 변화시켜 주반사면의 흡음률의 영향을 받는 주파수 응답함수의 제어가 용이해 질 수 있다. 전방 스피커에 대한 주반사면에서 좌석의 경우 운전자나 승차자가 항상 탑승하게 되므로 실제

적으로 음선이 좌석에 분포한다는 것은 운전자나 승차자에 따라 주파수 대역에서 음의 분포가 착용하고 있는 옷의 음향학적 특성에 따라 달라질 수 있으므로 주파수 응답함수 제어가 용이하지 않다.

- : 스피커의 위치
- : 탑승자 귀의 위치
- : 주반사면의 위치

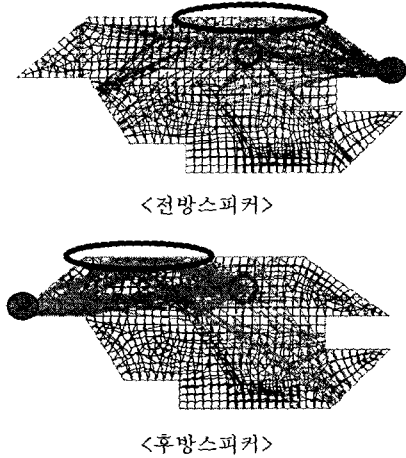


Fig. 5 Ray Tracing for Existing Model

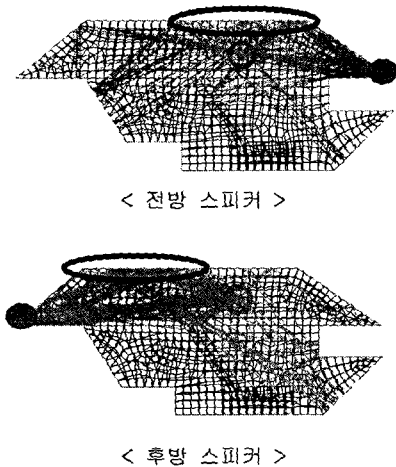


Fig 6 Ray Tracing for Improved Speaker Position

## 5. 주파수 응답함수

### 5.1 흡음률을 고려한 모델링

1/2 스케일 자동차 모형의 실내에 표. 2 과 같은 흡음률을 가진 음향 재료들을 이용하여 앞에서 주어진 기존의 모델과 음향 모드를 고려한 모델의 전방 스피커와 후방 스피커에 대한 주파수 응답함수를 시뮬레이션을 통하여 예측해 보았다.

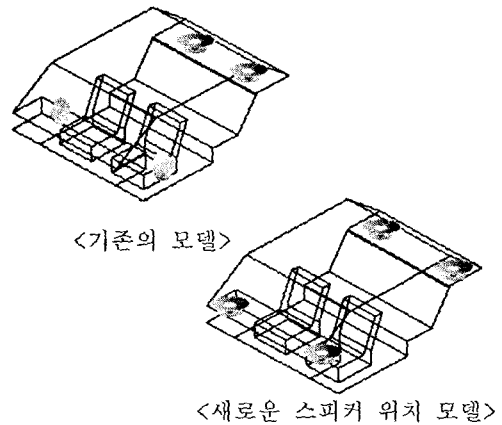


Fig. 7 Comparison of Speaker Positions

표. 2 Absorption Coefficient of Acoustical Material in Passenger Car

주파수 (Hz)	유리 Glass	천장 Acryl	좌석 Empty Chair	바닥 Carpet	스피커 지지부 Steel Deck
63	0.09	0.04	0.3	0.02	0.2
125	0.08	0.06	0.44	0.03	0.13
250	0.04	0.03	0.6	0.09	0.08
500	0.03	0.02	0.77	0.25	0.09
1000	0.03	0.03	0.89	0.31	0.08
2000	0.02	0.08	0.82	0.33	0.11
4000	0.02	0.08	0.7	0.44	0.11
8000	0.02	0.08	0.71	0.49	0.11

#### 5.1.1 전방 스피커에 대한 주파수 응답 함수

전방 스피커에 대한 주파수 응답함수의 변화는 Fig. 8 과 같다. 음향 모드를 고려한 후 마디평면을 피해서 스피커를 배치할 경우 스피커의 위치는 설계자의 의도에 따라 바뀔 수 있다. 본 연구에서는

3 장에서 확인한 바와 같이 마디선이 존재하지 않는 자동차 실내의 대시부 양끝에 스피커가 위치해 있다고 가정하고 다음과 같은 시뮬레이션을 수행하였고 4 장에서 언급했듯이 주반사면의 수가 감소하고 면적이 감소하여 Fig. 10 에서 주어진 1kHz 이상 고 주파수 대역의 흡음률이 높은 음향재료를 주 반사면(좌석)으로 가졌던 기존의 모델에 비해 주파수 응답함수는 대체적으로 응답이 좋아지고, 왜곡이 감소하여 기복이 적은(평평한) 주파수 응답함수를 획득할 수 있었다.

### 5.1.2 후방 스피커에 대한 주파수 응답함수

후방 스피커에 대한 주파수 응답함수의 변화는 Fig. 9 과 같다. 음향 모드를 고려한 후 마디평면을 피해서 스피커를 배치할 경우 스피커의 위치는 설계자의 의도에 따라 바뀔 수 있다. 본 연구에서는 3 장에서 확인한 바와 같이 마디선이 존재하지 않는 자동차 실내의 후방 트렁크 패키지 트레이 양끝에 스피커가 위치해 있다고 가정하고 5.1.1 에서 수행한 과정을 반복해서 시뮬레이션 해 본 결과 음향 모드를 고려한 스피커의 위치에 대한 주파수 응답함수는 기존의 모델에 비해 주파수 응답 레벨이 향상된 것을 확인 할 수 있다. 이는 전방 스피커에 비해 적은 변화를 보여주지만, 스피커 위치의 변화에 따라 주반사면의 수는 동일하나, 주 반사면의 면적이 약간 감소하여 음이 흡수될 수 있는 부분이 제거되어, 개선된 모델에서는 Fig. 9 와 같이 흡음면인 주반사면의 감소로 인하여 음압 레벨이 증가한 결과를 얻게 되었다.

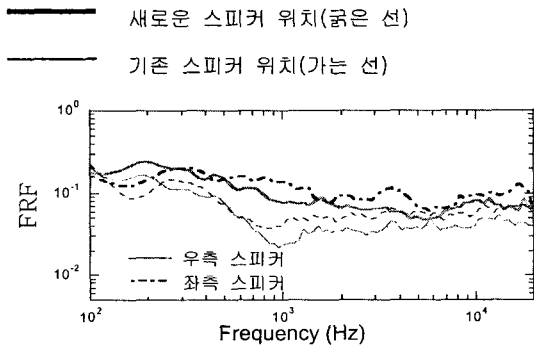


Fig 8 Comparison of Frequency Response Functions (Front Speaker)

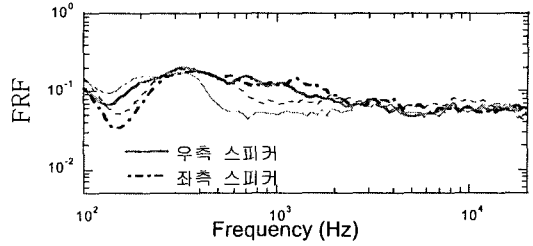


Fig 9 Comparison of Frequency Response Function (Rear Speaker)

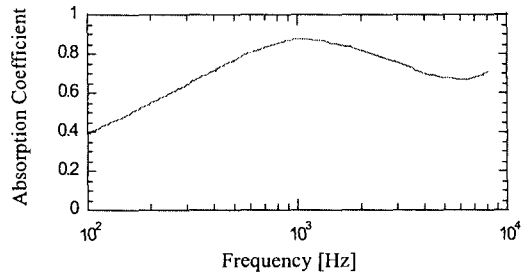


Fig 10 Absorption Coefficient of Main Reflection Plane (Seat)

## 6. 결론

실제 자동차에 대한 연구에 앞서, 1/2 스케일 자동차 실내에 대한 음향 모드, 음선 추적 기법을 통하여 자동차의 운전자의 위치 및 스피커의 위치를 최적화 하기 위한 방법을 연구해 본 결과, 자동차 실내의 음향 모드는 운전자 위치와 스피커 위치 최적화에 이용되며 특히 마디평면이 존재하는 부분에 운전자, 스피커가 위치할 경우 음의 왜곡이 발생하며, 마디평면을 피해서 운전자를 위치, 혹은 스피커를 배치해야 왜곡 없는 자동차 실내음을 만들 수 있다. 이를 바탕으로 재배치한 스피커로부터 나온 음선은 자동차의 특정 부위에 높은 밀도를 가지고 부딪치게 되는데 이러한 면을 주반사면이라 하고 주반사면의 흡음률을 주파수 응답함수의 왜곡과 기복(평평함)의 정도를 제어할 수 있는 중요한 요소가 된다. 이러한 점을 바탕으로 음향 모드를 고려한 후 음선 추적 기법을 이용하여 주반사면을 결정하고 주파수 대역 간에 기복이 없는(평평한) 주파수 응답 함수를 만들기 위해서는 설계자가 원하는 재료를 선택하는 하는 것이 중요하다.

위와 같은 방법을 이용하여 자동차 실내 공간 설계 시 고가의 장비를 도입하여 음압 레벨을 제어하는 전기음향을 하기에 앞서 설계자가 원하는 차실 내부의 주파수 응답을 얻기 위한 최적 음향 설계를 위하여 효율적인 방법이 될 수 있다.

### 참고문헌

(1) 신호철, “위상이 고려된 기하 음향 모델에 의한 내부음장 해석”, 한국과학기술원 기계공학과, 석사학위 논문(1997).  
 (2) 이정규, “흡음재 처리를 통한 차실 내부 음의 명료도 향상에 관한 연구”, 한국 소음 진동공학회지, 2000

(3) 이정규, “흡음재 처리를 통한 차실 내부 음의 명료도 향상에 관한 연구”, 한국 소음 진동공학회지, 2000.  
 (4) 이진우, “차실-트렁크 연성계의 연성 경로 및 음향 모드 특성에 관한 실험적 연구”, 대한 기계학회논문집, 제 25 권 제 8 호, pp.1302~1307, 2001.  
 (5) 이장명, “자동차 스피커의 위치 선정 및 오디오 성능평가 방법”, 한국자동차 공학회논문집, 제 4 권 제 4 호, pp.1~8, 1996.  
 (6) RAYNOISE Rev 3.0, User's manual, Numerical Integration Technologies.  
 (7) Norbert Kopco and Barbara Shinn-Sunningham, “Auditory Localization in Rooms : Acoustic Analysis and Behavior”, The 32nd International Acoustical Conference, 2002.