한국소음진동공학회 1995년도 추계학술대회논문집 pp. 123-129

자동차 오디오 시스템의 음질 개선 연구

°박 석 태

(Study of Sound Quality Improvement for Car Audio System)
(Seok Tae Park)

1. 서 론

문화수준의 향상으로 자동차는 종래의 단순히 운송수단이라는 개념에서 생활 문화 공간으로 자리잡아가고 있다. 이전에 차량 성능은 차량 동력 성능에 주안점을 두었으나, 점차 편의성 및 소음, 진동 문제가 주요 인자가 되고 있다. 이에 따라 많은 자동차 회사가 소음, 진동 저감 문제 해결에 노력을 하고 있으며, 앞선 회사들은 소음, 진동의 크기 뿐만 아니라 질 개선을 중요한 개선 연구 분야로 설정하고 이에 대한 연구를 추진하고 있다. 특히, 음악 애호가들은 가정에서 듣던 음악을 기억하면서, 자동차를 타고 가면서도 이와 같은 정도의 음질을 갖는 자동차 오디오 시스템 환경을 갈망하고 있다.

현재, 자동차 오디오 전문점에서는 자동차 오디오 음질 성능 개선을 갈망하는 소비자들의 요구에 부응하여 값비싼 여러 부품들을 조합하고, 경험으로 얻은 지식을 활용하여 자동차 오디오 시스템을 설치해 주고 있다. 그러나, 경험에 의존하므로, 어떤 경우에는 새로운 시스템을 설치하기 이전보다 악화된 음질 특성을 나타내는 경우도 생기게 된다. 이러한 것은 주관적인 경험만에 의존한 결과로 나타나는 것이므로, 자동차 오디오 시스템을 구성하는 튜너, 앰프, 라우드 스피커의 특성 및 차량 실내의 음향 공간 특성을 고려한 객관적인 음질 개선 방법론을 찾는 것이 필요하다. 통상, 자동차 오디오의 경우 같은 가격대의 튜너나 앰프의 경우 제품 특성에 커다란 차이는 없다고 보며, 소리 발생기인 라우드 스피커의 성능이 주요 변수라 추측된다. 특히, 라우드 스피커의 응답 특성 및 설치 위치, 설치 방향, 자동차 트렁크 및 실내 공간의 역할이 중요 인자라 추측된다.

자동차내의 음질 개선 문제는 차실내 공간의 협소성으로 인한 직접음과 반사음 문제 및 공간적으로 비 대칭적인 라우드 스피커 배치, 소음 저감 처리를 위한 흡 차음재 적용으로 인한 짧은 잔향 시간 등으로 일반적인 가정용 오디오 시스템에 적용되는 방법을 직접 적용하는 데는 어려움이 있다[1].

현재 자동차 오디오 음질 개선을 위한 연구로는 1) 운전자 양쪽귀 위치 또는 전방 승객석 양쪽귀 위치에서의 음압수준이 일정하도록 하여 사운드 이미지를 개선해 주는 국부적 음향 콘트롤 장치 개발[2], 2) 차실내 라우드 스피커 위치가 적절치 않게 선정되었을 경우, 오디오 시스템의 전기적 보상 장치로는 이를 보완할 방법이 없으므로, 적절한 위치를 찾기 위한 사운드 레이 추적법을 이용한 음장 모의 시험법 개발[1], 3) DSP 응용기술을 이용하여 차실내에서 사람이 공간감을 느끼게 되는 1차 반사음을 능동 소음 제어기법으로 제거하고, 반사음 및 잔향음 제어 를 통하여 실제 음악이 연주되는 콘서트 홀등의 음장을 재현하는 방법등이 있다[3,4].

본 논문에서는 차실내에서의 음질 개선을 위한 연구로 먼저 차실내 라우드 스피커의 장착위치에 따른 차실 음장 특성 분석에 주안점을 두고자 한다.

° 고등 기술 연구원, 정회원
아주대학교 시스템 공학과

2. 본 론

2-1. 차실내 정상상태 음향응답 특성시험

차량에 장착된 라우드 스피커는 자체 특성에 차실 공간 특성 및 장착위치에서의 후면 공간 특성(인스트루먼트 판넬 내부공간, 전방 차실문의 내부 공간, 트렁크 공간)으로 인해 수음자에게는 다른 음향특성을 가진 음원인 것으로 생각된다.

전방 좌,우측 도어에 각각 1개 및 후면 트렁크의 좌,우측에 각각 1개의 라우드 스피커가 장착된 시험차량에 대한 정상 음향 응답(Steady State Response, SSR) 특성 시험을 수행하였다. Fig.1 에 개략적인 시험도를 나타내었고, 사용한 장비는 B&K 2012 오디오 분석기 시스템과 B&K 4100 토르소로 운전자 좌석에 놓고 시험을 하였다.

Fig.1 Test setup for frequency response under baffled condition

Fig.2 는 4개의 라우드 스피커(전방 도어쪽 2개, 후방 트렁크쪽 2개)에 각각 1 Watt 파워를 주고 20 ~ 20,000 Hz 까지 가진 하였을때의 운전자 양쪽귀 위치에서의 음압수준을 나타낸다. 전반적으로 주파수 응답 특성이 평탄하지 않음을 보여주며, 양쪽귀에서의 응답에서도 많은 차이가 있음을 알수 있다. Fig.3 ~4 는 각각 전방 라우드 스피커 1개씩만을 가진 시킨 경우로 운전자 왼쪽귀 위치에서의 응답 특성에 커다란 dip이 나타남을 보여주며, 이 경우 이러한 dip 이 발생한 주파수 영역이 중요한 음악 또는 음성을 재현시 현장감이 결여된 음질을 얻게된다.

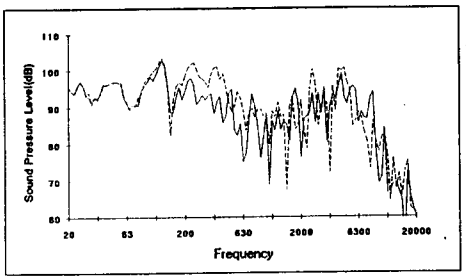

Fig.2 Comparison of SPL at driver's ears under operating front and rear loudspeakers, 1 Watt
(—— : left ear, --- : right ear)

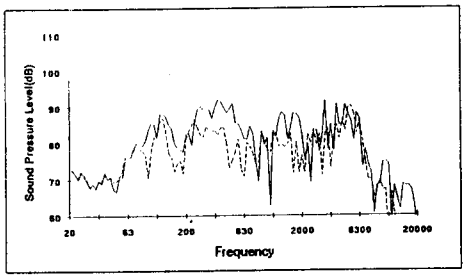

Fig.3 Comparison of SPL at driver's ears under operating front left loudspeaker, 1 Watt
(—— : left ear, --- : right ear)

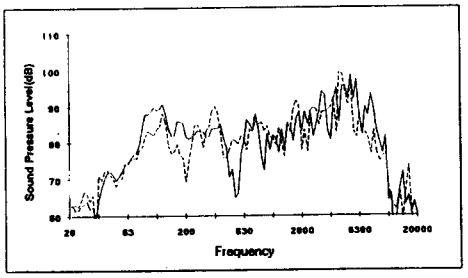

Fig.4 Comparison of SPL at driver's ears under operating front right loudspeaker, 1 Watt
(—— : left ear, --- : right ear)

Fig.5 ~6 은 후방 라우드 스피커를 1개씩 각각 가진 시

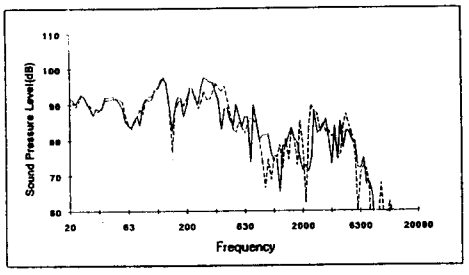

Fig.5 Comparison of SPL at driver's ears under operating rear left loudspeaker, 1 Watt
(—— : left ear, --- : right ear)

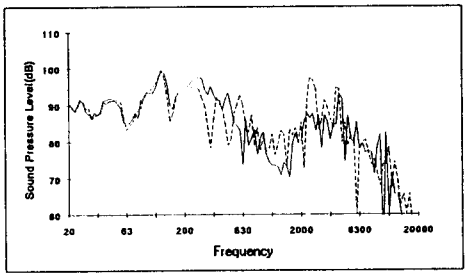

Fig.6 Comparison of SPL at driver's ears under operating rear right loudspeaker, 1 Watt
(—— : left ear, --- : right ear)

컸을 때의 결과로 1 kHz 근방에서의 특성이 특히 안좋음을 보여준다. Fig.7 ~8 은 각각 전방 라우드 스피커 2개를 동시에 가진 하였을 경우와 후방 라우드 스피커 2개를 동시에 가진한 경우를 나타낸다. 상대적으로 후방 라우드 스피커만을 가진한 경우는 1 kHz 부근의 주파수 특성이 악화된 결과를 보인다.

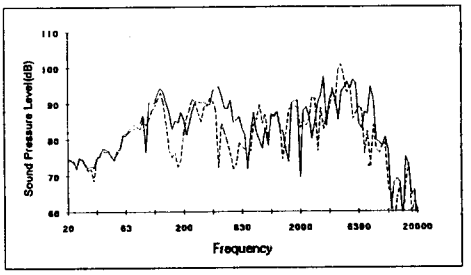

Fig.7 Comparison of SPL at driver's ears under operating front left and right louspeakers, 1 Watt
(—— : left ear, --- : right ear)

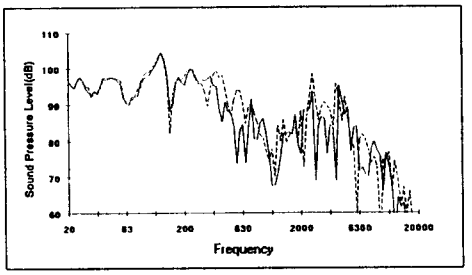

Fig.8 Comparison of SPL at driver's ears under operating rear left and right loudspeaker, 1 Watt
(—— : left ear, --- : right ear)

이상의 정상 응답 음향 시험에서는 전반적으로 전 주파수 영역에서 평탄하지 않은 주파수 특성을 나타내었다. 따라서, 이러한 결과가 라우드 스피커 특성에 의한 것인지, 장착 방향 또는 차실내 공간 특성에 의한 것인지를 파악하는 것이 필요하다.

2-2. 라우드 스피커의 특성 분석

2-2-1. 유한 배플상태에서의 음향특성시험

시험 차량에 장착된 전,후방 각각 2개의 라우드 스피커를 유한 배플에 장착하여 음향 특성 시험을 하였다. 라우드 스피커의 음향 특성 시험시 무향실이 없는 경우에는 라우드 스피커를 유한 배플에 장착하여 시험하여도 무향실에서와 같이 라우드 스피커의 특성 결과를 얻을 수 있다[5]. Fig.9 에 시험장면을 나타내었다.

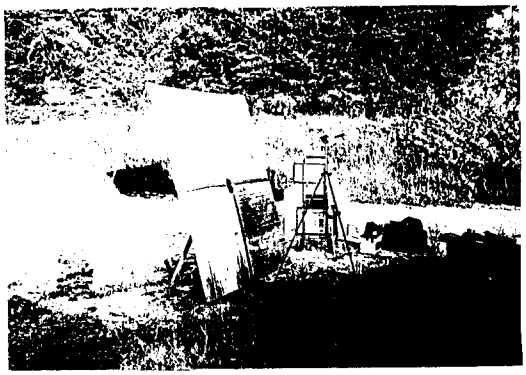

Fig.9 Test setup for SSR and TSR mode in a sample car

라우드 스피커 자체의 음향 특성을 파악하기 위하여 배플된 상태하에서 자유 음장 상태에서 시험을 하여 Fig.10 과 Fig.11 을 얻었다. Fig.10 은 전방 좌, 우측 라우드 스피커에 대한 시험결과로 100 ~ 20,000 Hz 범위까지 거의 평탄한 특성을 보여준다. Fig.11 은 후방 좌,우측 라우드 스피커에 대한 시험 결과로 60 ~ 5,000 Hz 까지 평탄한 음향 응답 특성을 보여준다. 따라서, 2-1 절에서의 차실내에서의 정상 상태 음향응답 결과는 라우드 스피커의 특성에 의한 것이기 보다는 차실내 공간 특성에 의한 것이라는 것을 추측케 한다.

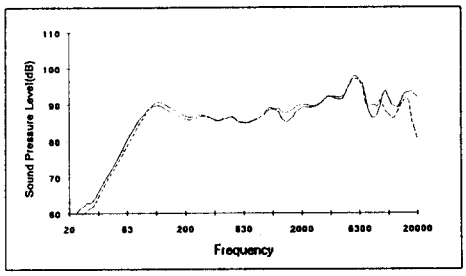

Fig.10 Comparison of SPL for front left and right loudspeaker under finite baffle-installed
(—— : front left, --- : front right)

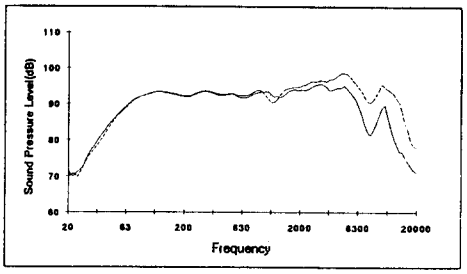

Fig.11 Comparison of SPL for rear left and right loudspeaker under finite baffle-installed
(—— : rear left, --- : rear right)

2-2-2. 라우드 스피커의 모델링

차실내에 장착된 라우드 스피커 특성 변경을 위해서는 라우드 스피커 자체에 대한 매개 변수를 규명하여, 이를 이용한 모델 변경에 따른 모의 시험을 한다. 차실내 공간 효과 및 라우드 스피커가 장착된 후면 공간 효과가 라우드 스피커의 임피던스에 미치는 영향을 파악하기 위하여, Free-air 상태하와 차량에 장착된 상태하에서의 임피던스 시험을 하여 Fig.12 ~ 15 에 나타내었다. Fig.16 과 Fig.17 에는 차량 장착상태하에서의 전방 및 후방 라우드 스피커 좌,우측의 임피던스 차이를 알기 위하여 행한 시험 결과이다.

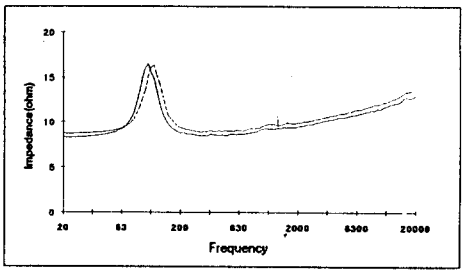

Fig.12 Comparison of Impedance level for front loudspeakers under car-installed
(—— : front left, --- : front right)

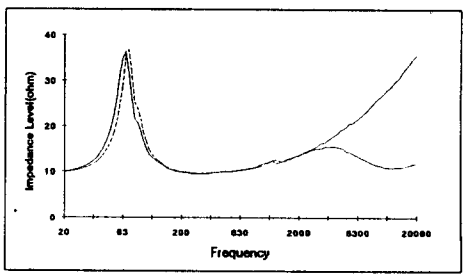

Fig.13 Comparison of Impedance level for rear loudspeakers under car-installed
(—— : rear left, --- : rear right)

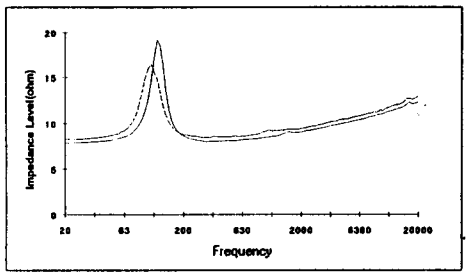

Fig.14 Comparison of Impedance for front left loudspeaker under free-air and car-installed
(—— : free-air, --- : car-installed)

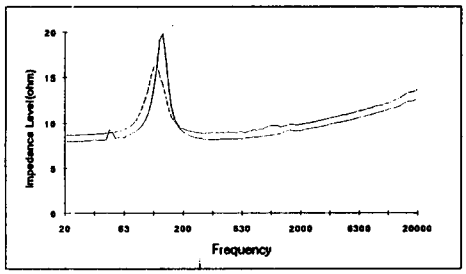

Fig.15 Comparison of Impedance for front right loudspeaker under free-air and car-installed
(—— : free-air, --- : car-installed)

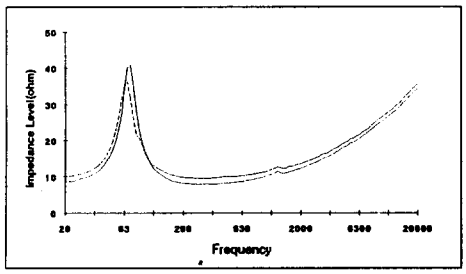

Fig.16 Comparison of Impedance for rear left loudspeaker under free-air and car-installed
(—— : free-air, --- : car-installed)

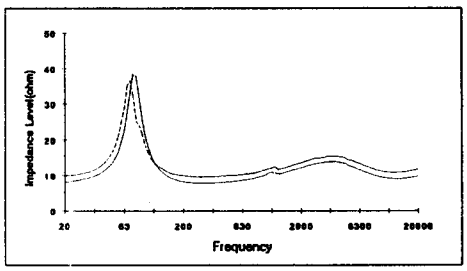

Fig.17 Comparison of Impedance for rear right loudspeaker under free-air and car-installed
(—— : free-air, --- : car-installed)

라우드 스피커의 모델링은 Fig.18[5] 과 같이 나타낼 수 있다. 여기에 나타나는 매개 변수들은 앞서의 연구자들의 방법에 따라, 라우드 스피커에 대한 임피던스 시험을 하여 얻었다. 차실내 공간효과 및 라우드 스피커가 장착된 후면 공간 효과가 임피던스에 미치는 영향을 파악하기 위하여 임피던스 시험을 라우드 스피커에 대하여 다음의 방법으로 매개 변수를 구하였다.

Fig.19[6] 와 Fig.20[7] 은 Fig.18 과 등가 회로이다.

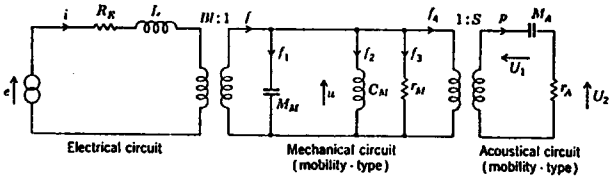

Fig.18 Complete analogous circuit for a direct-radiator loudspeaker of the moving coil type

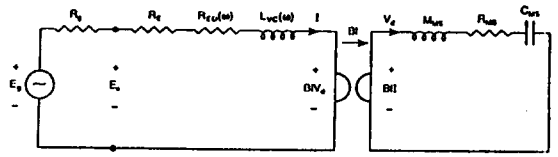

Fig.19 Impedance type model of a loudspeaker in free air

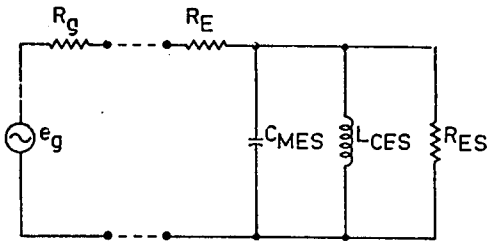

Fig.20 Electrical equivalent circuit of moving-coil electrdynamic driver

여기서,

- B : magnetic flux density in driver air gap
- C_{AS} : acoustic compliance of driver diphragm assembly including voice coil and air load
- C_{MS} : mechanical compliance of driver suspension
- C_{MES} : electrical capacitance due to driver mass
- E_{ff} : efficiency
- l : length of voice coil conductor in magnetic field
- L_{CES} : electrical inductance due to driver compliance
- M_A : air load mass on the two sides of the diaphragm
- M_{AS} : acoustic mass of driver diaphragm assembly including voice coil and air load
- M_{MS} : mechanical mass of driver diaphragm assembly including voice coil and air load
- Q_{ES} : ratio of voice coil dc resistance to reflected motional reactance at fs
- Q_{MS} : ratio of driver electrical equivalent frictional

resistance to reflected motional reactance at fs

R_{AS} : acoustic resistance of driver suspension losses

R_E : dc resistance of voice coil

R_{ES} : electrical resistance due to driver suspension losses

R_{MS} : mechanical resistance of driver suspension losses

S_d : effective projected surface area of driver diaphragm

V_{AS} : volume of air having same acoustic compliance as driver suspension

Fig.18 ~ Fig.20 의 등가개에서 다음의 관계가 얻어진다.

$$C_{MS} = C_{AS} / S_d^2 \quad (1)$$

$$M_{MS} = M_{AS} \cdot S_d^2 \quad (2)$$

$$R_{MS} = R_{AS} \cdot S_d^2 \quad (3)$$

$$C_{MES} = M_{AS} \cdot S_d^2 / (Bl)^2 \quad (4)$$

$$L_{CES} = C_{AS} \cdot (Bl)^2 / S_d^2 \quad (5)$$

$$R_{ES} = (Bl)^2 / (S_d^2 \cdot R_{AS}) \quad (6)$$

Fig.21[7] 에는 임피던스 측정 예이다. 여기서

$$Q_{MS} = \frac{f_s\sqrt{r_o}}{(f_2 - f_1)} \quad (7)$$

$$Q_{ES} = \frac{Q_{MS}}{(r_o - 1)} \quad (8)$$

$$Q_{TS} = \frac{Q_{MS} \cdot Q_{ES}}{(Q_{MS} + Q_{ES})} \quad (9)$$

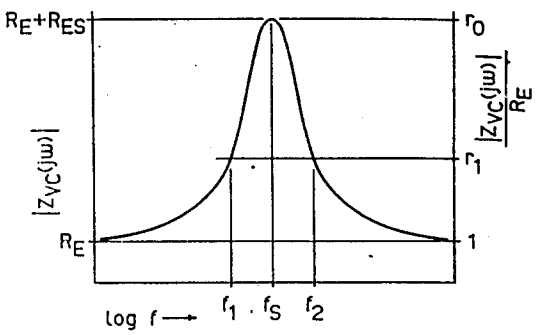

Fig.21 Driver voice-coil impedance magnitude

Free-air 상태에 대하여

$$M_A = 2.67a^3\rho_o \quad (10)$$

Free-air 상태에서 라우드 스피커의 원래상태와 부가질량을 부착하여 가진 하였을때의 공진 주파수를 각각 ω_o, ω_o'라 하면

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{M_{AS} \cdot C_{MS}}} \quad (11)$$

$$\omega_o' = \frac{1}{\sqrt{(M_{AS} + M_{ADD}) \cdot C_{MS}}} \quad (12)$$

이 얻어진다. 식 (11) , (12) 와 $M_{AS} = M_A + M_{MD}$ 를 이용하면 식 (13) ~ (15) 가 얻어진다.

$$M_{AS} = \frac{M_{ADD}}{(\omega_o/\omega_o')^2 - 1} \quad (13)$$

$$M_{MD} = M_{AS} - M_A \quad (14)$$

$$C_{MS} = \frac{1}{M_{AS} \cdot \omega_o^2} \quad (15)$$

또한, 식 (16) ~ (18) 관계가 성립한다.

$$V_{AS} = \rho_o \cdot c^2 \cdot C_{AS} = \rho_o \cdot c^2 \cdot C_{MS} \cdot S_d^2 \quad (16)$$

$$Q_{MS} = \omega_o \cdot C_{MES} \cdot R_{ES} = \frac{1}{\omega_o \cdot C_{AS} \cdot R_{AS}} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} Q_{ES} &= \omega_o \cdot C_{MES} \cdot R_E \\ &= \omega_o \cdot R_E \cdot M_{AS} \cdot S_d^2 / (Bl)^2 \\ &= \omega_o \cdot R_E \cdot M_{AS} / (Bl)^2 \end{aligned} \quad (18)$$

식 (18) 에서

$$Bl = \sqrt{\frac{\omega_o \cdot R_E \cdot M_{AS}}{Q_{ES}}} \quad (19)$$

식 (17) 에서

$$R_{MS} = R_{AS} \cdot S_d^2 = \frac{\omega_o \cdot M_{AS}}{Q_{MS}} \quad (20)$$

음향 효율은 식 (21) 과 같다.

$$E_{ff} = \frac{P_A}{P_E} = \frac{4\pi^2}{c^3} \cdot \frac{(2\pi\omega_o)^3 \cdot V_{AS}}{Q_{ES}} \quad (21)$$

시험용 라우드 스피커 샘플(삼미음향, 모델명 SR-08B100, 직경 8인치, 임피던스 8 ohm, 공칭 파워 100 Watt)에 대하여 앞서의 방법으로 구한 결과를 Table 1. 에 나타내었다.

Table 1. Identification of loudspeaker parameter for modelSR-08B100

Case / Characteristics	Symbol, Unit	Given Data	Identified result
1.VoiceCoil Inductance	Le, mH	0.7	
2. D.C.Resistance	Re, ohm	6.8	6.9
3.Resonance Frequency	Fo, Hz	62.19	62.19
4. Total Q Factor	Qts	0.4574	0.37
5. Electrical Q Factor	Qes	0.4834	0.39
6.Mechanical Q Factor	Qms	8.4	11.88
7. Equivalent Acoustic Compliance	Vas, Liters	26	35.07
8. Piston Area	Sd, m^2	0.0214	0.027
9.Volume Displacement	Vd, ccm	42.76	5305
10.Reference Efficiency	Ref Eff, Percent	1.31	2.12
11. Moving Mass of Diaphragm only	Mmd, g	13.03	16.5
12. Moving Mass of Diaphragm, AirLoad	Mms, g	15.56	19.04
13. Mass of Air Load on Diaphragm	Ma, g	2.54	2.54
14. Compliance(*10^-4)	Cms, m/N	4.1	3.439
15. BL Product	BL, N/A	9.33	11.47
16. Rms	Nsec/m	0.7298	0.626
17 Zmax			219.3

2-3. 음향전달경로 분석에 의한 운전자 위치에서의 음향특성분석

2-1절에서의 음향 특성은 정상 상태의 음향 응답으로 대체적인 음압 평균 수준을 나타내는 데에는 유용하나, 사람이 음장을 느끼게 되는 특성인 시간에 따라 변하는 진행파의 음향 분석(직접파, 반사파, 잔향음)에는 부적절하다. 실내에서 라우드 스피커에서 음이 나와서 운전자가 듣게 되는 음은 1) 직접음, 2) 1차 반사파, 3) 고차 반사파, 4) 잔향음으로 구분할 수 있으며, Richard C. Heyser가 1967년에 발표한 시간 지연 분광법[N](Time Delay Spectrometry, TDS)을하드웨어적으로 구현한 B&K 2012 오디오 분석기를 이용하여 차실내에서 시간에 따라 음이 진행함에 따른 운전자가 듣게 되는 직접파, 1차 반사파, 잔향음을 구하였다. Fig.22 는 시험차량의 모든 라우드 스피커를 가진 하였을때의 시험 결과이다. Fig.23 은 시험 차량에서 전방 오른쪽 라우드 스피커만을 구동시 운전자 왼쪽귀가 듣게되는 음장을 나타낸다. A-B 구간은 직접음의 영역이며, B-C 구간은 1차 반사음의 영역이고, C-D 구간은 잔향음 구간이다. Fig.24 에는 Fig.23 에서의 직접음과 1차 반사파에 의한 음향 응답 특성을 나타낸다. Fig.25 에는 전방 우측 라우드 스피커에 대한 배플된 상태하의 음압 수준과 차실내에서 가진시의 음압 수준을 나타낸다. 차실내의 경우 운전자 왼쪽귀가 듣게 되는 직접음만의 음향 응답 특성이다. Fig.26 에는 시험 차량에 대한 잔향 시간 측정 결과이다.

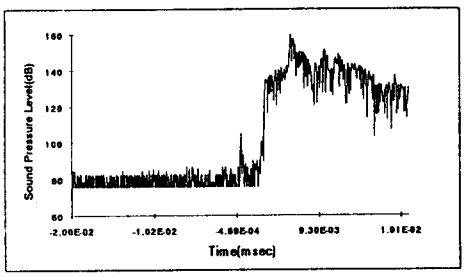

Fig.22 Sound field at driver's left ear in sample car under operating front and rear loudspeaker

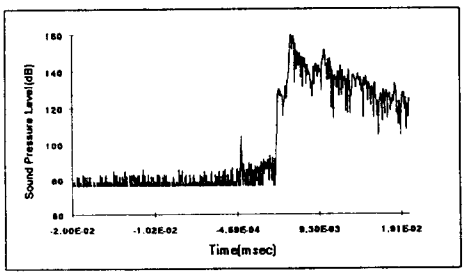

Fig.23 Sound field at driver's left ear in sample car under operating front right loudspeaker

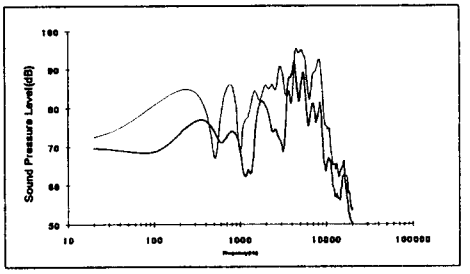

Fig.24 SPL comparison for direct and first reflected sound for a sample car at driver's left ear

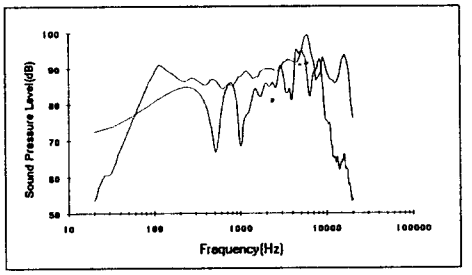

Fig.25 SPL comparison for baffled and car-installed for front left loudspeaker

3. 결 론

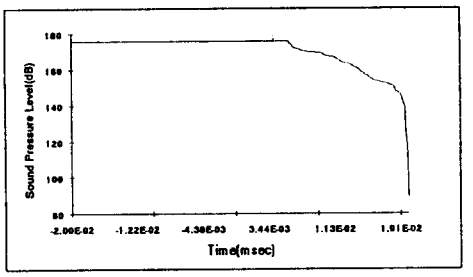

Fig.26 Response decay curve under operating front and rear loudspeakers

본 논문은 차실내 음향 특성 개선 연구로 수행중이며 정상 상태 음향 응답 특성 시험을 통하여 차실내에서 운전자가 듣게되는 음장 특성을 알게 되었고, 라우드 스피커에 대한 음향 특성 시험으로 이러한 차실내 음장의 비평탄성은 라우드 스피커 자체의 문제가 아니라 차실 공간등의 요인에 의한 것이라는 것을 추론할 수 있었다. 배플 상태 및 차량에 장착된 상태하의 라우드 스피커에 대한 임피던스 시험 결과로 임피던스의 장착 부위의 후면 공간이 임피던스 특성 변화를 가져오게 하는 것을 알 수 있었다. 임피던스 시험 결과를 이용하여 라우드 스피커에 대한 모델 매개 변수를 규명할수 있었고, 이를 이용한 라우드 스피커의 모델 개선이 가능하게 되었다. 또한, 시간 지연 분광법을 이용하여 차실내에서 음향 전파 과정 분석을 할 수 있었고, 이로 인해 운전자가 시간에 따라 다른 음향 응답 특성으로 듣게 되는 것을 알게 되어 향후

음질 개선 연구 수행에 이용될 수 있다. 이러한 방법으로 음이 진행함에 따라 부딪히는 반사면의 흡음 또는 반사 특성을 파악할수도 있어서 흡음재의 선정 및 라우드 스피커의 장착 위치 및 각도를 선정하는데 이용될 수도 있다. 향후의 연구 방향은 어떠한 음향 패턴이 운전자가 좋은 음향이라고 느끼게 되는지를 규명하는 것, 즉 주관적 평가와 객관적 시험 데이터 사이의 연관성을 확립하는 것과 라우드 스피커 모델링 기법과 차실 공간의 음향 특성을 이용한 차실내 최적 음향 조건을 규명 하는 것이 될 것이다.

4. 후 기

본 연구는 대우 전자 오디오 사업부의 지원하에 이루어진 것을 밝히며 관계자들의 도움에 감사드립니다.

5. 참고문헌

1. S. Ishikawa, et al, "A Method of Sound-Field Simulation for Automobile Passenger Compartment," SAE Paper 840085 (1984)
2. H. Kondo, et al, "Development of Sound Localization Control Systemfor Car Audio," SAE Paper 840083 (1984)
3. T. Chono, et al, "Sound Field Control in a Car Compartment," SAE Paper 880235(1988)
4. T. Asami, et al, "Development of a practical DSP Car Audio System," SAE Paper 920081 (1992)
5. Leo L. Beranek, Acoustics, Acoustical Society of America, 1986
6. Soren Jonsson, "Accurate Determination of Loudspeaker Parameters using Audio Analyzer Type 2012 and Laser Velocity Transducer Type 3544," Application Note for Electro Acoustic, pp. 20 ~ 27.B&K
7. Richard H. Small, "Direct-Radiator Loudspeaker System Analysis," J. Audio Eng. Soc., vol. 20, pp. 383 ~ 395 (1972 June)
8. Richard C. Heyser, "Acoustical Measurement by Time Delay Spectrometry," J. Audio Eng. soc., vol. 15, pp. 370 ~ 382 (1967 Oct.)