

차량 내 공간에서의 저주파 이퀄라이징

The equalization of low frequency response in automotive space

김미정, 김래훈, 성광모
서울대학교 음향공학연구소

Mi Jung Kim, Lae-Hoon Kim, Koeng-Mo Sung
E-mail: mjkim@acoustics.snu.ac.kr

요약

콘서트 홀과 같은 대형 공간의 경우와는 달리, 자동차 내의 작은 공간에서는 저주파의 음향 공진으로 인하여 상대적으로 높은 크로스오버 주파수까지 재생된 사운드가 컬러링 된다. 이러한 크로스오버 주파수는 Schroeder의 'large room limit'로 결정되며, 이것은 작은 공간과 대형 공간을 구분하게 되는 기준이 된다. 이러한 컬러링을 보상하기 위해, 먼저 대역 제한된 사인 스위프 신호를 이용하여 특정 차량의 저주파 응답 범위를 크로스오버 주파수까지 측정하였다. 본 논문에서는 이렇게 측정한 저주파 응답을 이퀄라이징하는 방법에 대하여 논의한다.

1. 서론

최근 자동차 안에서의 음장에 대한 관심이 많아지고 있는데, 이는 차량 내의 오디오 기기 뿐만이 아니라 차량 공간 자체의 영향을 받게 된다. 자동차 공간은 아주 작은 공간이므로 일반적인 청취 환경과는 다른 통계적인 특성을 갖게 된다. 이런 특성 중 대표적인 것은 상당히 높은 주파수 즉 Schroeder 주파수까지 공진에 의한 영향을 받게 된다는 것이다[1]. 이 공진이 두드러지게 나타나는 상한 주파수 이하에서는 왜곡이 귀에 쉽게 들리게 되고, 이 경우 왜곡된 주파수 응답을 갖는 스피커로 재생하는 것과 같은 효과를 낸다. 이러한 주파수의 증폭이나 감쇠는 음색의 왜곡으로 느껴지게 된다. 따라서 왜곡된 주파수 응답을 평탄화하는 작업은 타당하다. 그러나 공간의 충격응답에서 고주파로 갈수록 공진의 중첩 정도는 우리 귀가 주파수 응답의 변화 양상을 인식하지 못할 정도로 심해지게 되는데, 이는 통계적인 양상으로 설명될 수 밖에 없다 [1]. 본 논문에서는 이러한 음색 왜곡의 두드러진 원인이 되는 저주파 공진으로 인한 저 주파수 대역에서의 왜곡을

잘 알려진 신호 처리 기법을 이용하여 평탄화 하는 작업을 수행한다 [4]. 이러한 저주파 대역의 이퀄라이징 작업은 운전자의 일반적인 머리 이동 거리에 비해 파장이 훨씬 길기 때문에 특정 청취 등화점 이외의 넓은 지역에서 청취 했을 때에도 그 이퀄라이징 효과를 얻을 수 있는 장점을 갖는다.

2. 차량 내 공간의 음향 특성

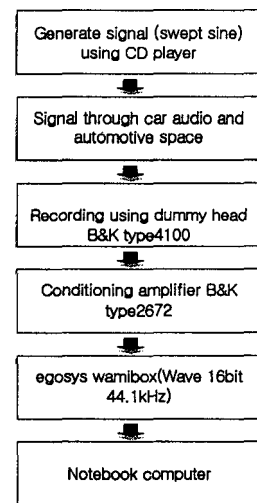


그림 1 측정 과정

그림 1은 차량 내 공간의 음향 특성을 측정하는 과정을 블록도로 그린 것이다. 측정을 위한 신호로는 swept sine 이 사용되었다. 이 신호는 MLS 신호의 동기화된 방식의 재생 녹음 이라는 단점을 갖지 않는다. 따라서 미리 CD로 제작하여 대상 차량 내에 있는 CD player를 이용해서 재생하였다. 재생된 신호는 그 차량에 갖춰져 있는 앰프 및

스피커 등의 오디오 장비를 통해 차량 내 공간으로 방사된다. 더마헤드 B&K type 4100을 이용해 left, right 신호를 녹음하고 이를 conditional amplifier B&K 2627로 증폭한 후 노트북용 사운드 카드인 egosys wamibox를 이용하여 노트북에 hard recording 하였다. 이렇게 recording된 신호에서 차량 내 공간의 충격응답을 얻어내기 위해 deconvolution을 수행하였다. 측정된 차량 내에서 그와 같은 방식으로 얻어진 좌우 시간응답과 주파수 응답은 각각 그림 2와 그림 3에서 확인할 수 있다.

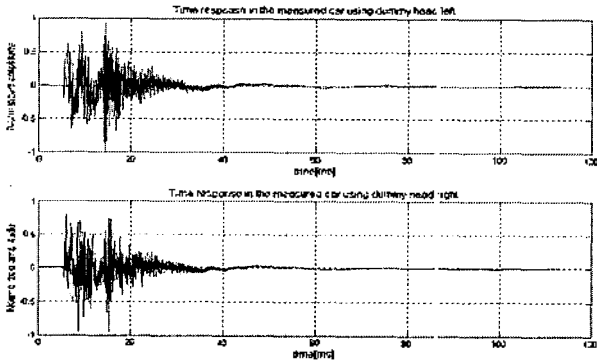


그림 2 더마헤드를 이용하여 측정된 차량 내의 임펄스 응답

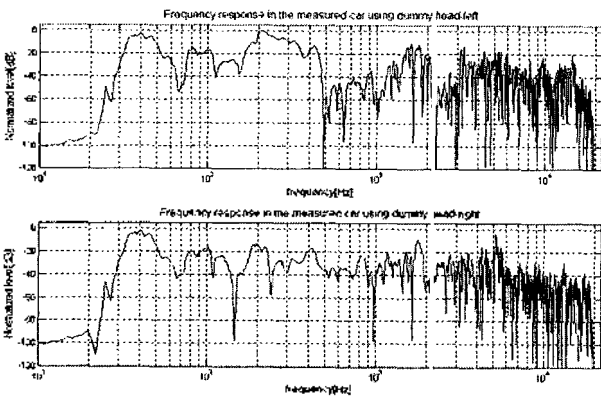


그림 3 더마헤드를 이용하여 측정된 차량 내의 주파수 응답

우리 귀가 음고를 인식하는 방법이 로그리듬 방식이라는 것은 널리 알려진 사실이다. 즉 100Hz에서 200Hz와 200Hz에서 400Hz가 같은 간격으로 인식된다는 것인데, 그만큼 저주파수에서의 resolution이 좋다는 의미이기도 하다. 위 그림 3에서 저주파 부분은 천천히 변하고 peak와 dip의 폭이 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 측정 당시의 주파수 스위프 신호를 차량 내 공간으로 재생했을 때 우리 귀에도 저주파에서의 음원의 크기 변화가 쉽게 감지되었던 것이다.

그러나 고주파 부분은 저주파에 비해 상대적으로 빨리 변하기 때문에 그 peak나 dip을 들어서 감지하기는 불가능하다. 이는 우리 귀가 short-time spectral analyzer이므로 고주파의 fluctuation이 audible coloration을 발생시키지 않는다는 room acoustics에서 잘 알려진 사실로도 설명이 가능하다. 일반적인 청취 환경인 대형 공간에서의 주파수 특성은 이러한 고주파 효과가 아주 낮은

저주파 영역(큰 콘서트 홀의 경우 20Hz부근에서부터 나타난다)부터 나타나기 때문에 지금까지는 이를 분석하고 평가하기 위해서 고주파들의 통계적인 특성, 즉 평균값이나 표준편차 등에 관심을 갖았던 것이 일반적이었다. 그러나 차량 내와 같이 소형 공간의 영역으로 들어오기 시작하면 그 크로스오버 주파수(Schroeder frequency)가 200~500Hz까지 올라오게 되고, 이 이하의 주파수 응답은 기존의 스피커나 앰프에서 적용되는 주파수 특성의 flatness를 그 척도로 사용할 수 있게 된다.

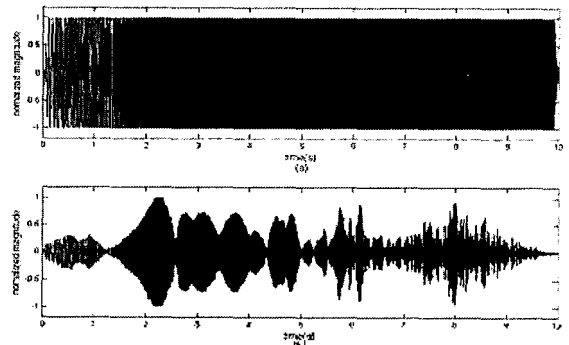


그림 4 입력 로그 스위프 신호와 레코딩된 바이노럴 신호

따라서 이런 차 실내와 같은 공간에서는 두 부분을 나누어서 음향 특성 평가의 기준을 달리해야 한다. 본 논문에서는 이 두 부분 중 보다 많은 공간 정보를 담고 있고, deterministic하며, 넓은 범위에서 그 유사성을 가지는 저주파대역을 보상하는 것에 그 초점을 맞추고 있다.

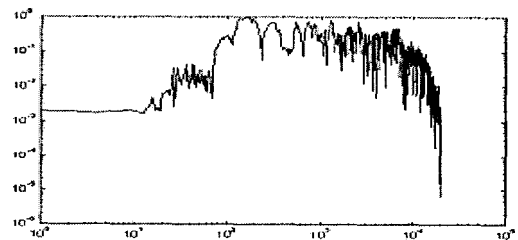


그림 5 카니발8718의 주파수 응답 곡선

그림 5는 우측 front speaker만 사용한 경우의 가청 주파수 대역내의 카니발8718의 주파수 응답 곡선이다. 위의 경우에서 보는 것처럼 저주파 영역의 경우 일반적인 6inch unit를 사용하고 있기 때문에 100 또는 200 Hz부터 재생되고 있음을 확인할 수 있다. 이 경우 unit 자체의 이러한 근본적인 특성을 무시하고, 무리하게 역 필터링 과정을 통해 이퀄라이징 하려는 것은 unit에 너무 많은 무리를 주는 결과를 초래하여, 결국은 많은 nonlinear distortion이 발생하는 예기치 않았던 나쁜 결과를 낳는다. 이러한 무리한 보상을 피하기 위해 후방에서 서브우퍼를 사용하고 있는 것이 일반적인 상황이다. 서브우퍼 및 모든 스피커를 동시에 드라이브하여 실제 청취 환경과 같은 상황일 때 얻은 주파수 응답 곡선이 그림 3이다. 그림 3에서는 보상하기 이전에 이미 충분히 낮은 대역인 40

혹은 50Hz의 저주파 음부터 재생될 수 있음을 알 수 있다.

3. 신호 처리를 이용한 차량 내 저주파 영역에 대한 이퀄라이징 방법

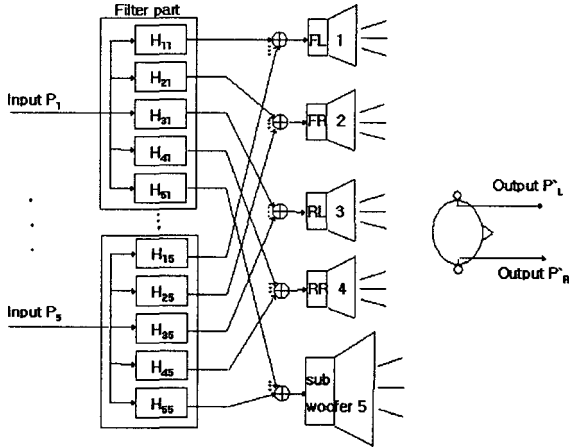


그림6. 차량 내에서의 채널 사운드 재생 시스템

그림6은 front stereo 한조, rear stereo 한조 총 4개의 스피커와 1개의 서브우퍼로 이루어진 차량 내에서의 다채널 사운드 재생 시스템을 보여준다. 아래식은 위의 상황을 matrix형태로 나타낸 것이다.

$$\begin{bmatrix} P_L \\ P_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1L} & C_{2L} & C_{3L} & C_{4L} & C_{5L} \\ C_{1R} & C_{2R} & C_{3R} & C_{4R} & C_{5R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & H_{14} & H_{15} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & H_{24} & H_{25} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} & H_{34} & H_{35} \\ H_{41} & H_{42} & H_{43} & H_{44} & H_{45} \\ H_{51} & H_{52} & H_{53} & H_{54} & H_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{bmatrix} = \mathbf{CH} \mathbf{I} \quad (1)$$

여기서

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{1L} & M_{1R} \\ M_{2L} & M_{2R} \\ M_{3L} & M_{3R} \\ M_{4L} & M_{4R} \\ M_{5L} & M_{5R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_L \\ P_R \end{bmatrix} = \mathbf{M} \mathbf{P}_{in} \quad (2)$$

만약 입력 신호가 바이노럴 레코딩된 신호라면

$$\mathbf{CHM} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{을 만족해야 한다. 하지만 이 경우의 H를 구}$$

하는 것이 쉽지 않을 뿐 아니라, 이런 조건을 만족시킬 수 있는 범위는 아주 제한적이다. 이러한 범위를 소위 'sweet spot'이라고 부른다. 이 sweet spot을 넓히려는 것은 현재의 이슈가 되고 있으며 여러 사람들에 의하여 연구되고 있다. 본 논문에서는 conventional stereo recording의 충실한 재현에 그 목적을 두고 있다. 또한 크로스오버 주파수 이하의 저주파 대역에 대해서 관심이 있으므로, 양귀로 들어오는 신호의 시간 차이가 미미해지고, 그러한 저주파에서의 응답은 따라서

$$\mathbf{CH} \approx \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

을 그 목적으로 한다. 이것은 conventional stereo reproduction의 경우 IID (Interaural Intensity Difference) ITD (Interaural Time Difference)를 고려하는 것이 일반적인 청취환경임을 생각 하면 쉽게 이해될 수 있다. 그리고 고주파 응답은 저주파에의 모델링 delay와 같은 값을 갖도록 한다. 이 경우 그림6의 filter part는 아래의 그림7 과 같이 바뀐다.

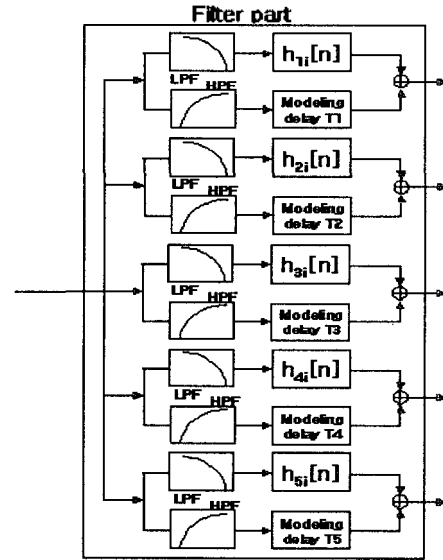


그림7

물론 차량 내 청취 공간이 운전자를 중심으로 비대칭인 것과 머리 크기를 보정하기 위해서 각각의 스피커 출력에 delay를 주어서 조정할 수도 있다. 이 경우

$$\mathbf{CH} = \begin{bmatrix} e^{jaD1} & e^{jaD2} & e^{jaD3} & e^{jaD4} & e^{jaD5} \\ e^{ja(D1+\Delta)} & e^{ja(D2+\Delta)} & e^{ja(D3+\Delta)} & e^{ja(D4+\Delta)} & e^{ja(D5+\Delta)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

로 만들어주면 된다. 예를 들어 그림8에서와 같이 두 개의 front speaker의 경우를 생각해 보면 이러한 delay의 도입은 왼쪽 실선의 스피커를 점선의 자리에 갖다 놓는 효과를 갖도록 만들어 준다. 이것은 왼쪽으로 치우쳐 들릴 수밖에 없는 음상을 보정해 주는 효과를 준다.

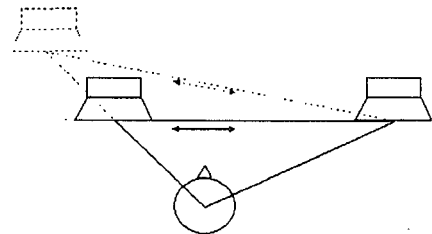


그림8

그러나 본 논문에서는 식(3)의 경우에 대해서만 생각한다. 왜냐하면 이러한 delay의 도입은 우리가 현재 다루는 equalization part가 아니더라도 그 전단에서 해결할 수 있기 때문이다. 식(3)을 만족시켜주기 위한 방법으로는

식(1)에서 다음의 (5)식을 만족하면

$$H_{ii} = ((C_{iL} + C_{iR})/2)^{-1}, H_{ij}(i \neq j) = 0 \quad i=1,2,3,4,5 \quad (5)$$

식(3)으로 근사화가 가능하다. 물론 식(5)대신 다음의 식(6)을 써도 가능하다.

$$H_{ii} = C_{im}^{-1} \quad (6)$$

여기서 C_{im} 은 머리 중앙에서 무지향성 다이크를 이용하여 측정된 충격응답이다. 이것 역시 지금의 관심 대역이 충분히 낮은 저주파이기에 가능한 일이다. 이때 다섯 개의 모든 스피커를 같은 임펄스 신호로 동시에 드라이브 하게 되면 P'_L, P'_R 모두 5로 같은 값을 갖게 된다. 이렇게 equalization시키는 것은 아래의 식과 거의 같은 효과를 갖는다.

$$\begin{bmatrix} P'_{L,e} \\ P'_{R,e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H'_{11} & H'_{12} \\ H'_{21} & H'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{L,dummy} \\ P_{R,dummy} \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서

$H'_{11} = 5P_{L,dummy}^{-1}, H'_{22} = 5P_{R,dummy}^{-1}, H'_{12} = H'_{21} = 0$ 로 하면 $P'_{L,e}, P'_{R,e}$ 모두 5로 같은 값을 갖게 된다. 따라서 본 논문에서는 식(7)과 같은 방식으로 equalization을 수행한 후, 이러한 방법의 타당성을 청취평가를 통해서 평가하였다.

본 논문에서는 각 더미헤드로부터 얻은 바이노럴 임펄스 응답의 저주파 부분을 이퀄라이징하기 위해 Kirkeby [4]의 알고리즘을 이용하였다. 이 알고리즘은 과도한 dip의 보상을 하는 경우 시스템에 지나치게 부하를 주게 되는 상황을 막기 위한 inverse technique으로 재생 시스템의 능력을 고려한 방법이다. 또한 주파수 도메인에서의 샘플링에 근거한 필터 디자인 방법에 관련된 wrap-around 효과를 피하게 한다.

4. 이퀄라이징 결과 및 청취 평가

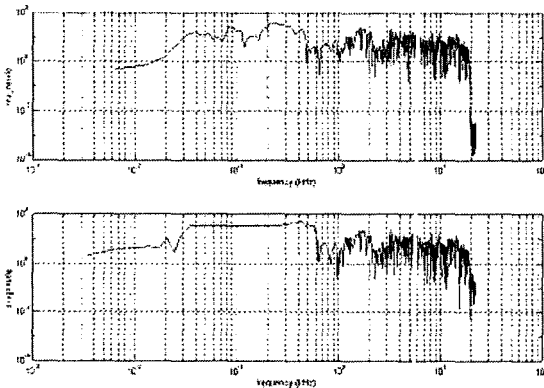


그림9. 이퀄라이징 전(위)과 후(아래)의 주파수 응답

그림9는 이퀄라이징 전과 후의 주파수 응답을 나타내는데 40Hz에서 400Hz까지의 주파수 응답이 평탄하게 됨을 알 수 있다. 이렇게 평탄화 된 바이노럴 신호를

저음역 재생이 필요한 청취 음원과 콘볼루션하여 두 가지 기법에 의한 결과와 처리하지 않은 신호를 가지고 비교 청취 평가를 수행하였다. 음악 샘플은 콘트라베이스 솔로, 일렉트릭 베이스 솔로 같은 다양하게 선택하였고, 아래와 같은 두가지 질문을 하였다.

- a) 어떤 것이 저주파수를 더 충실히 재생하는가?
- b) 두 샘플의 차이점이 어떤지 설명하시오.

그 결과 대부분의 사람들이 신호처리 방법이 적용된 신호를 선호하는 것으로 나타났고, 그 이유로는 저음역의 충실한 재생을 들 수 있다. 그림10은 설문 결과인데, 예상한 바와 같이 더 많은 사람들이 이퀄라이징 후의 음악 샘플이 저주파 음을 더 충실히 재생한다고 답하였다.

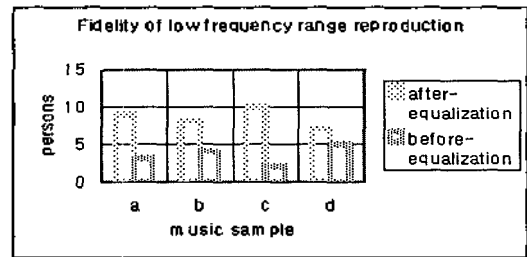


그림10 설문 결과 (저주파음 재생의 충실도)

5. 결론

본 논문에서는 차량 공간 내에 저주파 응답의 이퀄라이징을 도입하였고, 그에 대한 청취 평가를 하였다. 우리는 우선 저주파 범위에만 관심을 갖기 때문에 필터 구현을 매우 간단하게 할 수 있다. 또한 이러한 관심 대역인 400Hz이하의 저주파 대역에서는 운전자의 머리 이동에 비해 상대적 파장이 길기 때문에 이퀄라이징은 특정 청취 등화점 이외의 넓은 지역에서 청취했을 때도 적용될 수 있다는 장점을 갖는다. 따라서 스피커로부터 청자 머리까지의 임펄스 응답을 구한다면 이퀄라이징 필터 구현은 고정될 수도 있다.

6. 참고문헌

- [1] H. Kuttruff, 'Sound Fields in Small Rooms', in the Proc. of the AES 15th International Conf., Copenhagen, Denmark, 1998 October.
- [2] S. Muller, 'Transfer-Function Measurement with Sweeps', J. Audion Eng. Soc., Vol. 49, No. 6, 2001 June.
- [3] L.-H. Kim, C. Choi, K.-M. Sung, 'Digital equalization of low frequency response in automotive space' is now submitted to 113th AES Convention.
- [4] O. Kirkeby, P. A. Nelson, H. Hamada, F. Orduna-Bustamante, 'Fast Deconvolution of Multichannel System Using Regularization', IEEE Tras. on Speech and Audio Processing, Vol. 6, No. 2, 1998 March.