

# 귀의 특성을 고려한 스피커의 선형 왜곡보상 시스템의 설계 및 구현에 관한 연구

## Speaker Linear Distortion Canceller Considering Properties of Human Ear

이 원 우\*, 허 정 권\*, 김 진 영\*\*, 성 쾩 보\*\*

(Won Woo Rhee\*, Jung Kwon Huh\*, Jin Young Kim\*\*, K. M. Sung\*\*)

### 요 약

스피커는 입력이 전기신호이고 출력이 소리인 전기 음향 장치로서, 고유의 전달함수를 갖는 하나의 시스템으로 생각할 수 있다. 이러한 스피커 시스템의 전달함수는 여러가지 원인으로 인해 주파수 영역에서 평탄한 특성을 가지지 못하며 선형위상의 조건을 만족시키기가 힘들다.

음색을 변화시키는 스피커의 전달함수를 선형이라고 가정할 때, 스피커의 앞단에서 스피커의 선형 전달함수의 역에 해당하는 선형필터를 추가함으로써, 음색의 왜곡은 보정할 수가 있다.

본 연구에서는 이러한 스피커의 선형왜곡을 보상하기 위한 선형필터로서 FIR 필터를 사용하였으나, 2장에 제시되어 있는 기존의 알고리즘과는 달리 귀의 청감특성을 이용하여 가청주파수 대역에 대해 몇개의 대역으로 나눈 후, 각 대역마다 보상할 주파수 해상도를 달리하는 새로운 알고리즘(귀의 청감특성을 이용한 다해상도 선형왜곡 보상 시스템)에 대해 기술하였다.

이러한 다해상도 선형왜곡 보상시스템은 각 대역마다 다른 해상도로 보상한다는 점에서는 필터뱅크 보상 시스템과 유사하지만, 대역통과필터가 아닌 저역통과필터만을 이용하여 설계의 복잡성을 줄였으며 각 대역마다 독립적으로 보상하는 필터뱅크 보상시스템과는 달리 1차 대역에서 보상하지 못한 오차를 2차, 3차에서 보상하는 새로운 기법을 이용하였다.

본 알고리즘을 적용한 모의실험을 통하여 성능을 평가한 결과 가청음대역에서  $\pm 6\text{dB}$ 의 왜곡을 보인 스피커가, 실험 tap 수를 272로 했을 때,  $\pm 0.5\text{dB}$ 의 리플을 보이는 양호한 결과를 얻었다.

### ABSTRACT

A loudspeaker, an electro-acoustic device, is considered as a system that has electric signal as input and sound as output.

Due to various causes, transfer function of commercial loudspeaker does not have flat gain and linear phase characteristics in frequency domain.

If we assume that transfer function of a loudspeaker has linear characteristics, and if a linear filter that has inverse characteristics of the loudspeaker is added prior to the speaker, the tone distortion can be cancelled.

In this paper, FIR filter is used as a linear filter to compensate such linear distortion of the loudspeaker. Different from previous algorithms described in Chapter 2, a new algorithm(named Multi-Resolution Linear Distortion Canceller using psycho-acoustics) is discussed, which divides audible frequency region into multiple bands using psycho-acoustic properties of human ear and compensates linear distortion with different frequency resolution for each band.

\*삼성전자  
\*\*서울대학교

접수일자: 1993년 5월 10일

Multi Resolution Linear Distortion Canceller(MRLDC) in this paper is similar to filter bank system that compensates distortion of each frequency band with different resolution, but it is designed using only low pass filter and adopts a new technique that cancels the error from the first filter in the next filters.

When MRLDC algorithm using psycho-acoustic properties of human ear was applied to a loudspeaker that had 6dB distortion in frequency domain, we had satisfactory results of only 0.5dB ripple with 272 effective taps.

## 1. 서 론

원음을 재생하고자 하는 인간의 욕망은 지금까지도 계속되고 있다. 따라서 음을 재생시켜주는 스피커는 그 대상으로 삼아져왔으며 기술적으로나 회로적으로 끊임없이 개선되어 왔다. 그러나 그 한계가 점차적으로 드러났고 실제로 원음을 재생하기위해 여러가지로 개선한다하더라도 고급의 스피커는 터부니 없이 비싼 가격으로 판매되고 있는 것이 현실이다.

스피커의 왜곡은 크게 두가지로 나눌 수 있다. 첫째는 선형왜곡(linear distortion)이며 둘째는 비선형 왜곡(non-linear distortion)이다. 선형왜곡은 two-way 혹은 three-way 스피커인 경우 자체 crossover network를 아날로그 회로로 설계함으로써 생기는 요인과 진동판의 분할진동에 의한 것이 대표적인 요인으로 꼽힐수 있다. 이는 즉, 그림 1.과 같이 주파수특성이 평탄하지않은 특성으로 나타나게 된다. 비선형왜곡은 주로 저역(100Hz 이하)에서 나타나는데 이는 큰 입력이 들어오는 경우에 진동판이 큰 체적속도를 가지고 운동해야 하는데 그렇지 못함으로 해서 고조파 성분(harmonics)이 발생함을 의미한다. 이 비선형 왜곡의 요인은 진동판을 지지하고 있는 지지부(suspension)와 voice coil의 운동에 의한 자기력의 변동등이 있다[1].

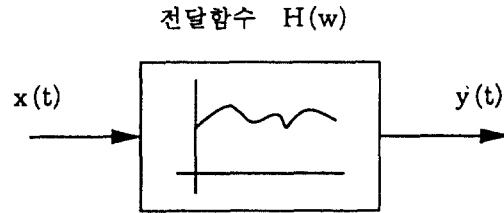
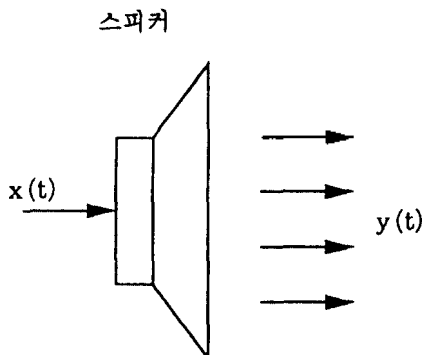


그림. 1. 스피커의 모델링

실제로 스피커의 왜곡은 선형왜곡이 주로 음질을 좌우하게 되며 따라서 본 연구에서는 선형왜곡 보상 시스템을 다루도록 하겠다.

## II. 기존의 선형 왜곡 보상 알고리즘[2]

지금까지 특허출원된 왜곡보상 시스템[3], [4]을 정리하여 보면, FIR 필터를 사용한다는 점과 보상하고자 하는 전 영역에서 일정한 해상도(resolution)을 갖는다는 특징을 가지고 있다. 그 주된 보상 방법은 필터 뱅크(filter bank)[5]를 이용하여 주파수 대역을 나누고 각 대역별로 FIR 필터를 사용하여 보상하는 방법이다. 이는 그림 2.에 보였다.

물론 가장 간단하고 널리 사용되어 지는 것은 대역이 하나 즉, 전 대역을 하나의 필터를 사용하여 보상하는 시스템이며, 이는 간단히 하드웨어로 구현할 수 있는 장점을 가지고 있다. 한편, FIR 필터를 이용하여 왜곡보상을 할 때, 보상하는 주파수 해상도는 다음과 같은 식으로 간단히 결정된다.

$$\text{Resolution} = \frac{\text{Sampling Frequency}}{\text{Order of FIR Filter}} \quad (1)$$

그러나, 위와 같은 방식을 사용하여 선형 왜곡 보상을 하고자 할 때, 저역에서 충분한 해상도를 가지고 보상을 하려면 필요한 tap수가 많아지게 되는데, 이런 경우에는 고주파 영역까지 불필요한 높은 보정

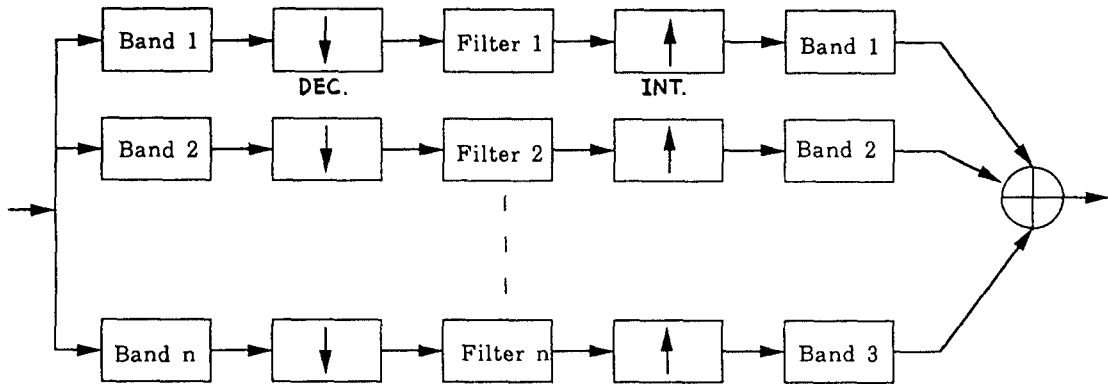


그림 2. 필터 뱅크를 이용한 기존의 선형 왜곡 보상 시스템

해상도를 유지하게 된다. 또한 필터뱅크를 이용하여 설계할 경우에는 그로 인한 설계가 복잡해지는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위한 한 방법으로서 귀의 특성을 직접히 고려하여 주파수에 따라 해상도가 다른, 즉 저역에서는 해상도가 높고 고역에서는 낮은 보상 시스템을 구성하고, 각 대역마다 따로 보상하는 필터뱅크 보상과는 달리, 저역통과 필터만으로 설계하여 앞단계에서 보상하지 못한 오차를 2차, 3차 대역에서 보상하는 새로운 기법을 사용하였다. 이에 대해서는 다음장에서 설명한다.

### III. 귀의 특성을 고려한 다해상도 선형 왜곡 보상 시스템

(multi-resolution linear distortion canceller considering properties of human ear)

사람은 귀를 통하여 소리를 듣게 되는데 귀는 외이, 중이, 그리고 내이로 이루어져 있다. 특히, 내이에 해당하는 달팽이관에서 소리의 주파수 분석이 이루어진다. 달팽이관을 펼치면 하나의 길다란 관으로 볼 수 있는데, 관의 각 위치에 따라 공진주파수가 달라서 임의의 위치점은 특정 주파수에 해당하게 된다. 그런데, 사람이 소리를 감지하는 달팽이관의 주파수 스케일(scale)은 선형적이지 않고 지수함수적인 특성을 가지고 있다. 즉, 사람의 소리 분석계를 필터 뱅크 시스템으로 볼 때, 각 대역은 중심주파수가 높을수록 대역폭이 커지는 constant-Q 형태를 나타낸다.

따라서 스피커의 왜곡을 보상하고자 할 때, 저역에서는 높은 해상도로 고역에서는 상대적으로 낮은 해상도로 보상할 필요가 생긴다. 본 상에서는 위와같은 개념하에서 주파수 대역에 따라 해상도를 달리하는 스피커 보상 시스템을 제시하고, 이에 대하여 논의하고자 한다.

#### 3-1. 주파수 해상도의 결정

위에서 설명한 비선형 주파수 스케일은 적당한 식으로 선형 주파수축과 관련되어 표현할 수 있는데, 이를 Bark-scale(critical filter bank)이라 하며, 다음과 같다.

$$Z = 7 \times \ln \left\{ \left( \frac{f}{650} \right) + \left[ \left( \frac{f}{650} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (2)$$

Bark scale의 Z는 달팽이관의 위치와 선형적 대응이 있다고 생각하면 될 것이다. 다해상도 선형 왜곡 보상 시스템(multi resolution linear distortion canceller)의 개념은 일반적인 보상 시스템과 같이 일정한 보상 해상도를 갖지 않고 Bark-scale, 즉 Z축에서 일정한 보상 해상도를 갖도록 보상시스템을 구현하는 것이다. 즉, Bark-scale상에서 일정한 갯수의 대역으로 나누고, 각 대역에 대해 같은 보상 해상도를 갖도록 FIR 필터의 tap수를 지정한다.

사람 귀의 특성을 고려하여 보상을 하기 위해서 이 Bark-scale상에서 대역을 나누기로 했다. 대역 수는 2개 이상이 되는데, 2개인 경우와 3개인 경우에 대해서 검토해 보았다.

1)대역이 2개인 경우

대역이 두개인 경우에 Bark-scale 상에서 균등하게 나누면 그림 3.에서와 같이 22.05kHz(fs = 44.1kHz 인 경우)까지 첫 대역이 되고 2.6kHz까지가 두번째 대역이 된다. 이제 각각의 tap수를 정해야 하는데, 앞에서 말했듯이 사람의 귀에서의 대역은 constant-Q의 특성을 보이므로 다음의 식을 이용한다.

$$\frac{29.5}{N_1} = \frac{14.8}{N_2} \tag{3}$$

$N_1$ : 첫번째 단 필터 계수의 갯수

$N_2$ : 두번째 단 필터 계수의 갯수

그리고 전체 tap수를 200개로 가정한 경우

$$N_1 + N_2 = 200 \tag{4}$$

가 되어야 한다.

식 (3)와 (4)를 이용하여  $N_1$ 과  $N_2$ 를 구하면  $N_1 = 133$ ,  $N_2 = 67$ 이 된다. 따라서 각각의 대역에서 사용되는 FIR 필터의 해상도는 식 (2)에 의해서 약 330Hz와 90Hz가 된다. 여기서 두번째 대역의 해상도, 90Hz는 7:1 decimation한 후의 계산 결과이다. 즉,  $44.1k/7/67 \approx 90Hz$ 이다.

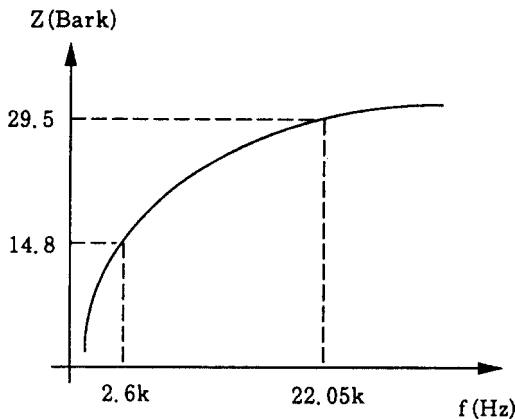


그림 3. Band가 2개인 경우의 Bark scale과 linear scale

2)대역이 3개인 경우

대역이 3개인 경우 역시 Bark-scale 상에서 균등하게 나누면 그림 4.와 같이 22.05kHz까지가 첫번째 대역이 되고 5.4kHz까지 두번째 대역, 그리고 1.2kHz

까지가 세번째 대역이 된다. 역시 constant-Q의 특성을 적용하면 다음의 식이 나온다.

$$\frac{29.5}{N_1} = \frac{19.7}{N_2} = \frac{9.8}{N_3} \tag{5}$$

역시 전체 tap수를 200으로 가정하면  $N_1 + N_2 + N_3 = 200$ 이 된다.

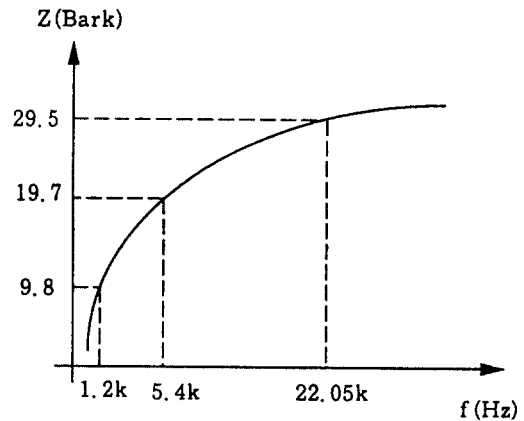


그림 4. Band가 3개인 경우의 Bark scale과 linear scale

앞의 두 식을 이용하여 각 대역에 사용되는 FIR 필터의 tap수를 구한 후 각 필터의 해상도를 구하면 표 1.의 결과를 얻을 수 있다.

표 1. Band를 세 개로 나눈 경우의 결과

	경계 주파수	경계 Bark	각 단의 tap 수	각 단의 해상도
Band 1	22.05kHz	29.5	98	450Hz
Band 2	5.4kHz	19.7	68	200Hz
Band 3	1.2kHz	9.8	34	90Hz

3-2. 구현(implementation)

다해상도 선형 보상 시스템의 구현은 그림 5.와 같이 구현할 수 있다. 이는 각 경계 주파수를 차단 주파수로 가지는 3개의 저역통과필터로서 구현이 가능하다. 이 때에는 첫번째 단에서 보상하지 못한 부분이나 필터링에 의해서 생기는 새로운 왜곡을 두번째, 세번째 단에서 보상한다. 역시 각 단의 sampling 주파수가 다르기 때문에 decimator, interpolator가 들어가게 되고 aliasing 방지용 저역통과필터가 각각 필

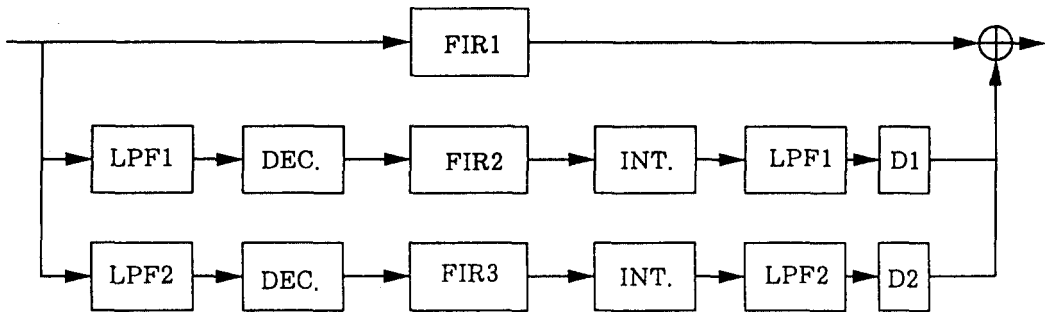


그림 5. 저역 통과 필터를 이용하여 구현한 경우의 블록도.

요하게 된다.

필터 뱅크를 사용해서 구현하는 경우(4)와 비교해 보았을 때, 시스템이 복잡하게 되고 각 단계에서의 시간 지연을 맞추어 주는 것이 어려운 단점이 있다. 반면에 저역통과 필터를 이용하는 경우는 우선 고역 통과 필터(high pass filter)가 필요없기 때문에 시스템이 간단해지고 필터 자체의 보상도 쉬워진다.

3-3. FIR 필터의 계수 계산

1) 첫번째 단(FIR 1)의 필터 계수 계산( $N_1$  개로 가정)

우선 스피커의 임펄스 응답을 무향실에서 측정한다. 측정된 임펄스 응답을  $s(n)$ 이라 하면  $s(n)$ 은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$s(n) = \sum_{k=1}^N \delta(k-n)s(k) \tag{6}$$

이  $s(n)$ 을 DFT(discrete fourier transform)하여 주파수 응답을 구하면

$$S(\omega_k) = \sum_{n=1}^N s(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \tag{7}$$

이 된다. 이 주파수 응답으로 묘사되는 시스템의 역 시스템에 해당하는 주파수 응답을 구하면

$$F_1(\omega_k) = \begin{cases} \frac{1}{S(\omega_k)} & f_k \geq 20\text{Hz} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{8}$$

이다. 여기서 20Hz이하의 값을 0으로 한 이유는 저주파 영역에서의 지나친 boost로 인한 스피커의 손상을 방지하기 위해서이다. 이 역 시스템의 주파수 응답에서  $N_1$ 개의 값을 0~44.1kHz사이에서 등간격으로 선

택하여 그 결과를 IDFT하여  $N_1$ 개의 계수를 얻는다.

2) 두번째 단(FIR 2)의 필터 계수 계산

만일 첫번째 단에서 완전히 보상을 준다면 원래의 임펄스 응답을 입력으로하여 필터링한 경우 그 출력은 어느 정도의 시간 지연을 가진 임펄스가 되어야 한다. 그런데 완전한 보상을 하기 위해서는 무한 차수의 FIR 필터가 필요하게 되므로 어느 정도의 오차가 섞여 나오게 된다. 두번째 단에서는 1)에서 보상하지 못한 이 오차를 보상하게 한다. 이 오차  $e_1(n)$ 을 제거하기 위해서

$$S(\omega) F_2(\omega) = -E_1(\omega) \tag{9}$$

이 되는  $F_2(\omega)$ 를 주파수 응답으로 가지는 두번째 FIR 필터를 그림 6.과 같이 첫번째 단과 병렬로 연결한다.

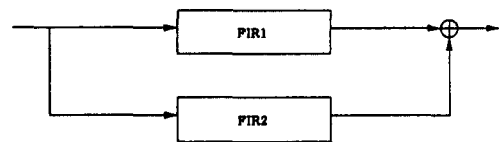


그림 6. 두 개의 단으로 이루어진 필터

그런데, 이  $F_2(\omega)$ 는 14.7kHz를 sampling 주파수로 가지고 필터이기 때문에 3:1 decimation과 1:3 interpolation이 들어가게 되고 그에 따라 두 개의 저역 통과 필터가 들어가게 되므로

$$F_2(\omega) = -\frac{E_1(\omega)}{S(\omega)} = F_2'(\omega) L_2^2(\omega) \tag{10}$$

$F_2'(ω)$  : 저역통과 필터의 영향이 제거된 함수

$L_2(ω)$  : 저역 통과 필터의 전달함수

이 된다. 그리고 5.4kHz 이하에서만 보상하게 되므로

$$F_2'(ω) = \begin{cases} -\frac{E_1(ω)}{S(ω)L_2^2(ω)} & 20\text{Hz} \leq f \leq 5.4\text{kHz} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

가 된다.

여기서  $44.1k/3 = 14.7k$ 까지를 등간격으로  $N_2$ 개의 값을 선택하고 IDFT하여  $N_2$ 개의 필터 계수를 얻는다.[5]

### 3)세번째 단(FIR 3)의 필터 계수 계산

세번째 단에서는 첫번째와 두번째의 단으로 이루어진 그림 6.의 시스템에 원래의 임펄스 응답을 넣을 때에 나오는 오차를 보상해준다. 그 과정은 2)와 마찬가지로 된다. 역시 오차  $e_3(n)$ 을 보상해주는 필터의 주파수 응답을  $F_3(ω)$ 라 하면

$$S(ω)F_3(ω) = -E_2(ω) \quad (12)$$

가 된다. 그리고 이 세번째 필터는 2.94 kHz의 sampling 주파수를 가지므로 15:1 decimator를 이용한다. 그리고 역시 저역통과필터가 두개 들어가므로

$$F_3(ω) = -\frac{E_2(ω)}{S(ω)} = F_3'(ω)L_3^2(ω) \quad (13)$$

$F_3'(ω)$  : 저역 통과 필터의 영향이 제거된 전달함수

$L_3(ω)$  : 저역 통과 필터의 전달함수

그리고 이 필터는 1.2kHz이하에서만 사용되므로,

$$F_3'(ω) = \begin{cases} -\frac{E_2(ω)}{S(ω)L_3^2(ω)} & 20\text{Hz} \leq f \leq 1.2\text{kHz} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

가 된다.

이 결과에서  $44.1k/15 = 2.94k$  이므로 이를 등간격으로 IDFT하여  $N_3$ 개의 FIR 필터 계수를 얻는다.

## I. 실험 및 결과

앞에서 기술한 귀의 특성을 고려한 다해상도 보상 시스템의 성능을 평가하기 위하여 컴퓨터 모의 실험을 수행하였다. 먼저 보상 시스템에 사용할 IIR 저역통과 필터를 설계하였다. 필터 설계는 아날로그 그 필터를 설계하여 디지털 영역으로 옮기는 기법을 사용하였다. 아날로그 필터는 여러가지를 시험해 보아 주어진 조건에서 가장 적은 차수를 요구하고 전이대역(transition band)이 날카로운 특성을 보인 elliptic 필터를 사용하였다. 그림 7은 실험에 사용한 스피커의 임펄스 응답과 주파수 특성을 보여주고 있는데, 임펄스 응답은 무향실에서 B&K Audio Analyzer type 2012를 사용하여 측정하였다. 그림 7은 주파수 특성을 살펴보면 스피커는 전대역에서 선형왜곡을 보이고 있음을 알 수 있다.

그림 8 (a), (b)는 2단 다해상도 보상 시스템에 의한 각 단계에서의 보상 결과들이다. 첫단의 보상결과를 살펴보면 3KHz이상의 고주파 대역에서는  $\pm 0.5$  dB이내의 리플을 보이는 거의 완벽한 특성을 보이고 있고, 1kHz에서 3kHz 대역에서는 약  $\pm 1$  dB이내의 리플이 보이고 있다. 물론 원음과 구별하기 힘든 리플이다.

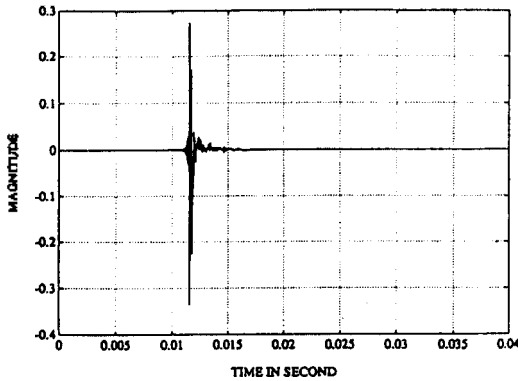
1kHz이하에서는  $\pm 1.5$  dB이상의 리플이 보여서 더 세밀한 왜곡보상이 필요함을 알 수 있다. 물론 다른 스피커를 사용하면 다른 보상특성이 나오지만 보상하는 필터의 해상도를 생각하면 다른 스피커에 대해서도 전라 이러한 결과를 얻을 수 있다.

두번째단에서는 위에서 만족스럽게 보상해주지 못한 1kHz이하의 부분을 보상하였다. 고역부분은 첫단의 결과가 그대로 나오기 때문에 첫단의 보상결과와 같고, 1kHz이하에서는 다른 특성을 보이게 된다. 자세히 보면 100Hz이상에서는  $\pm 0.5$  dB이하의 리플을 가지는 좋은 특성을 가지고 있으며, 30Hz에서 100Hz 사이에서는  $\pm 1$  dB정도의 리플을 보여 역시 귀로는 원음과 구분할 수 없는 특성을 보이고 있다.

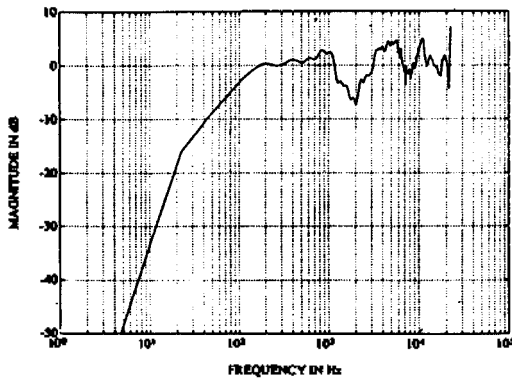
그림 9는 스피커를 포함한 전체 시스템의 임펄스 응답을 구한것인데, 이 임펄스 응답은 스피커의 이펄스 응답을 다해상도 보상 시스템에 입력으로 넣어 구한 결과이다. 스피커 자체의 임펄스 응답(그림 7(a))과 비교해 볼 때 보상 후에는 거의 완벽한 특성을 보이는 것을 알 수 있다.

그림 10은 전대역에 걸쳐 일정한 해상도를 가지고 1024 tap FIR 필터를 설계하여 보상한 결과를 보여 준다. 여기에서 살펴볼 수 있듯이 나해상도 보상 시스템은 총 272개의 tap수를 가지고도 거의 1024 tap으로 보상한 결과에 상응한다고 볼 수 있다. 본 모의 실험 결과를 기초로 하여 실시간 하드웨어를 제작하여 청취 test를 해 보았다. 필터 설계를 위한 DSP chip은 Texas Instrument사의 TMS5700X를 사용하였다. 이 하드웨어의 블록도는 그림 12와 같다.

그림 11(a), (b)는 무향실에서 실측한 스피커의 원래 주파수 특성과 보상한 주파수 특성을 보여주고 있다. 실제로 청취 test한 결과 저음에서는 보상하지 않은 경우보다 더 분명하면서 풍부한 저음을 들을 수 있었다. 고음에서는 거의 가까운 맑은 소리를 들을 수 있었다.

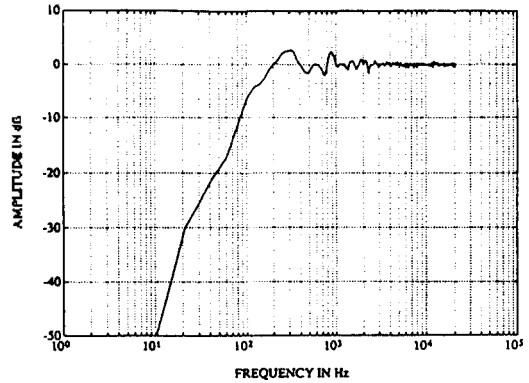


(a) 임펄스 응답

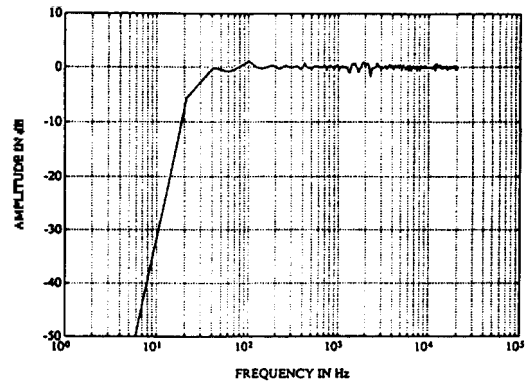


(b) 주파수 특성

그림 7. 사용한 스피커의 특성



(a) 첫단으로 보상한 결과



(b) 첫단과 둘째단으로 보상한 결과

그림 8. 나해상도 보상 시스템에 의한 보상(2단 이용)

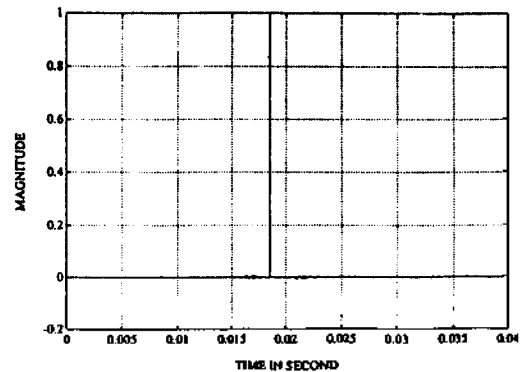


그림 9. 선형 왜곡 보상 후의 임펄스 응답

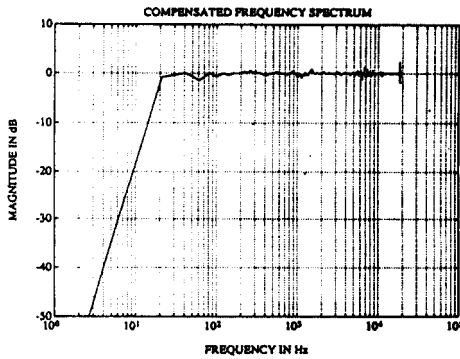
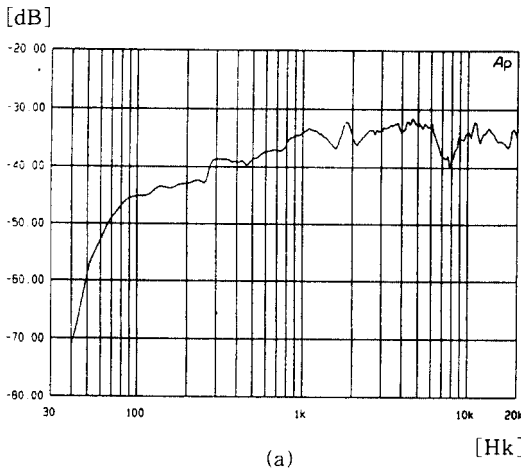
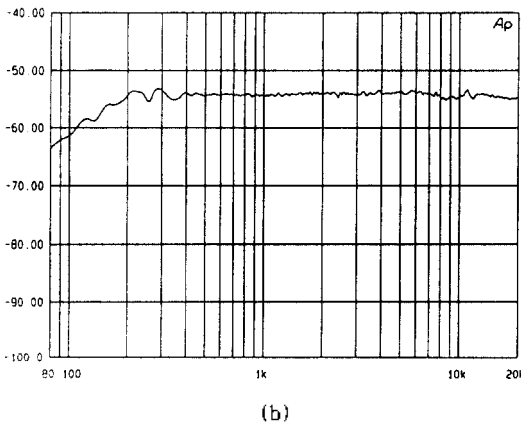


그림 10. 일정 해상도로 보상한 결과(1024 tap)



(a)



(b)

그림 11. 보상 전 및 보상 후의 무향실 실측 결과

### V. 결 론

본 연구에서는 스피커의 선형왜곡을 보상하는데

있어서 기존의 가청주파수 대역에 대해 일정한 해상도로 나누어 보상하는 방법과 필터뱅크로 설계하여 가 대역을 따로 보상하는 방법과는 달리, 대역을 나눌 때, 귀의 청감특성을 이용하여 저역통과필터로 대역을 나눈 후 1차 대역에서 보상하지 못한 오차를 2차, 3차 대역에서 보상하는 기법을 소개하고 전 대역을 1024 tap으로 보상한 결과와 본 알고리즘을 이용하여 22 tap의 효율적인 기법으로 보상한 결과와 그 성능을 비교하여 보았다.

그 결과, 이러한 다해상도 선형 왜곡 보상시스템(multi-resolution linear distortion cancelling system)은 많은 tap 수를 필요로 하는 단해상도 보상 시스템과는 달리 사람의 귀의 특성을 고려하여 가청주파수 대역에 대해 몇 개의 대역으로 나눔으로써 적은 tap 수를 가지고도 많은 tap 수로 보상한 결과와 거의 비슷한 특성을 보여주었다. 실시간 처리를 함에 있어서도 많은 양의 계산을 필요로 하는 단해상도 선형 왜곡 보상 시스템과는 달리 계산량을 줄이고 이에 따르는 시간 지연을 줄임으로써 실시간 처리를 효과적으로 하게 하는 장점을 가지고 있다.

스피커의 왜곡을 보상한다는 점에 있어서는 기존의 스피커와는 달리 DSP를 이용하여 저가의 스피커로도 원음에 가까운 음을 재생시켜 준다는 점에서 큰 의의가 있다고 본다. 실제로 청취 test를 한 결과도 좋은 평가를 받았으며 스피커의 개발 방향에 있어서도 새로운 국면을 맞이하게 될 것으로 보인다. 새로운 응용연구로서는 adaptive filter를 이용한 적응 보상 시스템도 연구가 활발히 진행되고 있다.[6],[7]

앞으로 가전업계에 있어서 충분히 활용 가치가 있으며 소비자에게 보급형의 스피커로도 좋은 음질을 공급할 수 있을 것이다.

### 참 고 문 헌

1. Morse, P. M. and K. U. Ingard, *Theoretical Acoustics*, McGraw-Hill Inc., N.Y., 1968, pp.366-399.
2. Leckchat, D. and U. Heyder, "Verbesserung von Lautsprecher-Impulsantworten durch digitale Signalaufbereitung," *Acustica*, 70, pp.55-60.
3. Takashi, "Loudspeaker Device," United State Patent, No.4,888,811 Date : Dec. 19.1989.
4. Ishikawa *et al.*, "Digital Equalizer Apparatus Enabling Separate Phase and Amplitude Characteristic Modification," United States Patent, No.4,888,808, Date : Dec.19.1989.



5. Oppenheim, A. V., Advanced Topics In Signal Processing, Prentice Hall, 1988, pp.158-174
6. F.X.Y.Gao.and W.M.Snelgrove, "Adaptive Linearization of a Loudspeaker," IEEE Trans on Circuits Systems, 1991, pp. 3589-3592.
7. J.Kuriyama and Y.Furukawa, "Adaptive Loudspeaker System," J. Audio Eng. Soc., Vol.37., No. 11., 1989.

▲이 원 우(Won Woo Rhee)



1990년 2월 : 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
 현재 : 삼성전자 A/V 연구소 연구원

▲김 진 영(Jin Young Kim)

1986년 2월 : 서울대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
 1988년 2월 : 서울대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)  
 현재 : 서울대학교 전자공학과 박사 과정

▲허 정 권(Jung Kwon Huh)

1991년 2월 : 서울대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
 1993년 2월 : 서울대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)  
 현재 : 삼성종합기술원 연구원

▲성 광 모

현재 : 서울대학교 전자공학과 교수