

스피커시스템의 저주파 영역에서의 비선형 왜곡 보상에 관한 연구

두세진, 김의석, 성광모
 서울대학교 공과대학 전자공학과 응용전자연구실

A Study on the Nonlinear Distortion Cancellation of the Loudspeaker at Low Frequencies

S. J. Doo, E. S. Kim and K. M. Sung
 Applied Electronics Lab., Department of Electronics Eng., Seoul National Univ.

요 약

본 논문은 스피커 시스템의 이상적이지 못한 특성으로 인하여 발생하는 비선형 왜곡을 분석하고 스피커에 입력하는 신호들 전처리함으로써 비선형 왜곡을 감소시키도록 하는 것을 목적으로 한다. 비선형 왜곡의 가장 큰 요인인 강성과 force factor의 비선형성을 변위에 관한 2차항수로 모델링하여 이것을 바탕으로 전처리의 여러 계수를 결정하며 변위를 측정하여 귀환시키는 대신 선형 운동방정식을 적용하여 변위를 예측하도록 함으로써 시스템의 구현을 간단히 할 수 있도록 하였다. 이 왜곡보상시스템을 하드웨어로 설계하였다.

I. 서론

스피커 시스템에 있어서의 비선형 왜곡이란 음향이 입력에 비례하지 않고 비선형적으로 출력되는 것을 말한다. 비선형 왜곡은 음을 혼탁하게 만들어 스피커의 음질을 저하시킨다. 비선형 왜곡의 원인으로는 진동판 지지부와 스피커 안클로저의 강성의 비선형성, 유효자속밀도의 비선형성, 코일 인덕턴스의 비선형성, 영구자석과 지지부의 hysteresis 등을 들 수 있는데, 그중 강성에 의한 비선형성과 유효자속밀도에 따른 force factor의 비선형성이 보다 큰 영향을 미치며 이들은 진동판 변위에 대한 함수관계를 가진다. 비선형 왜곡을 감소시키기 위한 연구는 Kaizer, Klippel, Bin 등에 의해 수행되어 왔으나 [1-12] 음향출력을 계속 측정해야 하거나 여러가지 표를 준비해야 하는 등의 번거로움이 있다. 본 논문에서는 비선형 특성을 변위에 대한 함수로 모델링한 결과를 이용하여 비선형 운동방정식을 세우고 이것으로부터 직접 비선형 왜곡을 보상하는 알고리즘을 개발한다. 이 방법은 변위를 미리 예측하여 사용하므로 출력을 측정하여 귀환시켜야 하는 번거로움이 없고 하드웨어 구현이 간단하다는 장점이 있다.

II. 비선형 왜곡 보상의 원리

본 논문이 제안하는 비선형 왜곡 보상 기법에 대해 간략한 예를 들어 살펴보기로 한다. 그림 1과 같은 1 자유도의 선형 시스템을 생각해 보면 그 운동방정식은 다음과 같다.

$$m\ddot{x} + r\dot{x} + kx = f \quad (1)$$



그림 1. 1 자유도를 갖는 진동계

여기서 f 는 외부로부터의 입력이다. 이 운동방정식은 선형이므로 x 는 힘 f 에 비례하게 되며, 정현파 힘에 대해 정현파의 해, 즉 정현파 변위 x 가 발생한다. 만일 강성 k 가 2차항수적 비선형 특성을 가져 운동방정식이

$$m\ddot{x} + r\dot{x} + kx(1 + \alpha x^2) = f \quad (2)$$

와 같이 되는 경우는 비선형 운동방정식이 되어 x 는 힘 f 에 비례하지 않으며, 정현파 힘에 대해 고조파가 섞인 변위 x 가 발생한다. 이 비선형 운동방정식에 f 대신에 다음과 같은 f' 를 입력하면,

$$f' = f + \alpha k x_1^3 \quad (3)$$

식 (2)는 다음과 같이 된다:

$$m\ddot{x} + r\dot{x} + kx + \alpha k(x^3 - x_1^3) = f \quad (4)$$

x_1 은 변위 x 의 예측값으로서, $x = x_1$ 이면 식 (4)는 선형방정식 인식 (1)이 되는 것을 알 수 있다. 즉 외부 입력을 적절히 변형함으로써 비선형방정식을 선형화할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 선형화 과정을 그림으로 나타내면 그림 2와 같이 출력된 변위 x 를 귀환시키는 형태가 된다. 이것은 일종의

MFB(motional feedback) 시스템이라고 볼 수 있다.

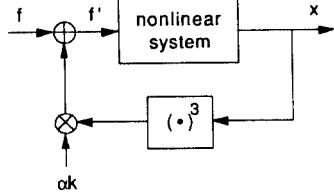


그림 2. 귀환을 이용한 비선형 왜곡 보상 시스템

이러한 귀환을 이용한 선형화는 출력을 계속 측정해야 하는 번거로움이 있다. 만일 비선형성이 작다면, 즉 $\alpha \ll 1$ 라면 식 (1)과 식 (2)의 해는 서로 유사하게 된다. 따라서 변위 x 를 측정하지 않고 선형방정식인 식 (1)의 해를 사용하여도 크게 오차가 나지 않는다. 즉 식 (4)의 x_i 로 식 (1)의 해를 사용할 수 있다는 것이다. 이 경우는 엄밀히 말하면 $x \neq x_i$ 이므로 완벽한 선형화는 불가능하지만 $x \approx x_i$ 이므로 식 (4)의 비선형항의 크기가 작아져 비선형 특성을 감소시킬 수 있다. 또한 식 (1)의 해는 간단히 계산하여 구할 수 있으므로 그림 2와 같이 x 를 귀환시키는 대신에 변위를 미리 예측하여 f' 를 만들어 줄 수 있으며, 그림 3에 이것의 개념도를 보였다.

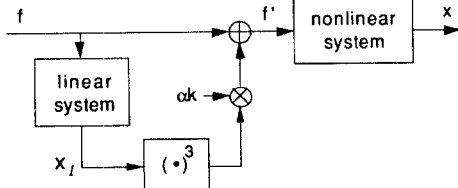


그림 3. Open loop 시스템으로 구현한 비선형 왜곡 보상 시스템

III. 스피커의 비선형 운동방정식

밀폐형 스피커를 기계적 등가회로로 변환하면 그림 4와 같이 되는데 여기서 m 은 방사임피던스에서 구한 부가질량이고 C_b 는 인클로저 내부의 공기탄성이며 f_g 는 스피커 진동판에 가해지는 힘이다.

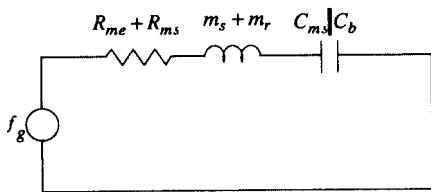


그림 4. 밀폐형 스피커의 기계적 등가회로

그림 4에서,

$$R_{me}(x) = \frac{[Bl(x)]^2}{R_g + R_e} \quad (5)$$

$$C_{ms} || C_b = 1/s(x) \quad (6)$$

$$f_g(x) = \frac{Bl(x)}{R_g + R_e} U_g \quad (7)$$

가 되어 여러 소자가 변위 x 에 관여되는 것을 알 수 있다. 여기서, $m_{sr} = m_s + m_r$, $R_{ge} = R_g + R_e$ 라고 하고 $s(x)$, $Bl(x)$ 의 모델을 그림 4의 등가회로에 적용하면 스피커의 운동방정식은 다음과 같이 된다.

$$m_{sr} \ddot{x} + \left\{ \frac{1}{R_{ge}(b_0 + b_1 x + b_2 x^2)} + R_{ms} \right\} \dot{x} + (s_0 + s_2 x^2)x = \frac{U_g}{R_{ge}(b_0 + b_1 x + b_2 x^2)} \quad (8)$$

IV. 비선형 왜곡 보상 시스템의 설계

스피커에 따라서는 강성의 비선형 특성이 지배적일 수도 있고 반대로 force factor의 비선형 특성이 지배적일 수도 있지만 본 논문에서는 강성과 force factor의 비선형 특성을 함께 고려하여 왜곡 보상 시스템을 설계하도록 한다. 스피커의 운동방정식은 앞의 식 (8)과 같으며 $Bl(x)$ 는

$$\frac{1}{b_0 + b_1 x + b_2 x^2} = \frac{1}{b_0} \left\{ 1 - \frac{b_1}{b_0} x + \left(\frac{b_1^2}{b_0^2} - \frac{b_2}{b_0} \right) x^2 \right\} \quad (9)$$

와 같이 Taylor series로 전개되므로 식 (8)은

$$U_g = [m \ddot{x} + r \dot{x} + k_0 x] + (m_1 \dot{x} + m_2 x^2) \dot{x} + (r_1 \dot{x} + r_2 x^2) \dot{x} + k_2 x^2 + k_3 x^3 + k_4 x^4 + k_5 x^5 \quad (10)$$

와 같은 다항식으로 표현되며, 여기서 각 상수들은

$$m = m_{sr} R_{ge} b_0$$

$$m_1 = m_{sr} R_{ge} b_1$$

$$m_2 = m_{sr} R_{ge} b_2$$

$$r = R_{ms} R_{ge} b_0 + \frac{1}{b_0}$$

$$r_1 = R_{ms} R_{ge} b_1 - \frac{b_1}{b_0^2}$$

$$r_2 = R_{ms} R_{ge} b_2 + \frac{1}{b_0} \left(\frac{b_1^2}{b_0} - \frac{b_2}{b_0} \right)$$

$$k_2 = R_{ge} (s_0 b_1 + s_1 b_0)$$

$$k_3 = R_{ge} (s_0 b_2 + s_1 b_1 + s_2 b_0)$$

$$k_4 = R_{ge} (s_1 b_2 + s_2 b_1)$$

$$k_5 = R_{ge} s_2 b_2$$

(11)

스피커시스템의 저주파 영역에서의 비선형 왜곡보상에 관한 연구의 값을 갖는다. 정현파 변위 $x = \hat{x} \cos \omega t$ 를 얻기 위한 입력 전압 U_i 는

$$\begin{aligned}
 U_s &= \frac{1}{2} \left[m_1 (\omega_0^2 - \omega^2) + k_2 \right] \hat{x}^2 \\
 &+ \hat{x} \left[\left\{ (\omega_0^2 - \omega^2) \left(m + \frac{3m_2}{4} \hat{x}^2 \right) + \frac{3}{4} k_3 \hat{x}^2 + \frac{5}{8} k_5 \hat{x}^4 \right\} \cos \omega t \right. \\
 &\left. - \omega \left(r + \frac{r_2}{4} \hat{x}^2 \right) \sin \omega t \right] \\
 &+ \frac{\hat{x}^2}{2} \left[\left\{ m_1 (\omega_0^2 - \omega^2) + k_2 + k_4 \hat{x}^2 \right\} \cos 2\omega t + r_1 \omega \sin 2\omega t \right] \\
 &+ \frac{\hat{x}^3}{4} \left[\left\{ m_2 (\omega_0^2 - \omega^2) + k_3 + \frac{5}{4} k_5 \hat{x}^2 \right\} \cos 3\omega t - r_2 \omega \sin 3\omega t \right] \\
 &+ \frac{1}{8} k_4 \hat{x}^4 \cos 4\omega t \\
 &+ \frac{1}{16} k_5 \hat{x}^5 \cos 5\omega t \\
 &= \hat{U}_0 + \hat{U}_1 \cos(\omega t - \phi_1) + \hat{U}_2 \cos(2\omega t - \phi_2) + \hat{U}_3 \cos(3\omega t - \phi_3) \\
 &+ \hat{U}_4 \cos(4\omega t - \phi_4) + \hat{U}_5 \cos(5\omega t - \phi_5)
 \end{aligned}$$

(12)

와 같이 되며 U_s 을 왜곡이 없는 스피커에 입력하였을 때 발생하는 음의 고조파 중 제 2, 제 3 고조파 성분의 크기를 기본파와 함께 표시해 보면 그림 5와 같다.

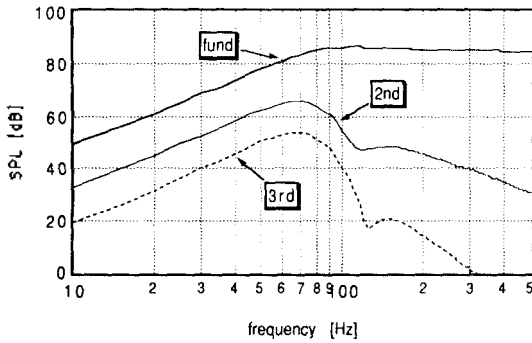


그림 5. 강성과 force factor의 비선형성을 모두 고려한 경우 정현파 변위를 얻기 위해 왜곡시킨 입력 전압을 왜곡없는 스피커에 가한 경우의 기본파와 제 2, 3 고조파의 크기

식 (10)을 이용하여 왜곡보상 시스템을 구현한 블록도를 그림 6에 보였다.

V. 시스템의 하드웨어 구현

앞에서 설명한 왜곡보상을 위한 알고리즘을 구현한 하드웨어 시스템의 전체 블록도는 그림 7과 같다.

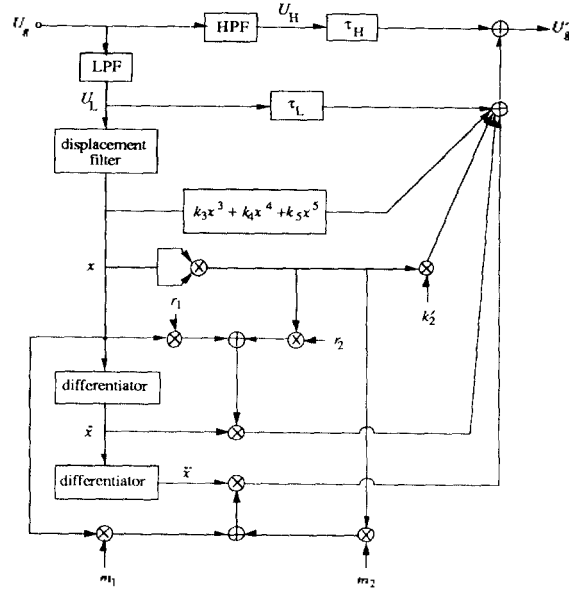


그림 6. 비선형 $B(x)$, $B(x)$ 를 모두 고려한 경우의 비선형 왜곡 보상 시스템 블록도

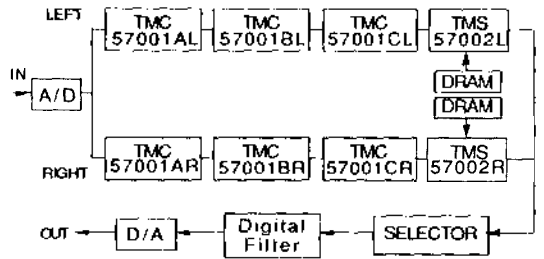


그림 7. 하드웨어 시스템의 블록도

알고리즘을 구현하기 위해 계산을 수행하는 부분은 left, right channel에 대해 각각 TMC57001 3개와 TMS57002 1개로 구성하였다. 여기서 쓰이는 칩은 일본의 Texas Instrument사에서 만든 음악, 음성등 audio signal processing을 위한 전용칩으로 24/32-bit의 내부 데이터 버스 구조를 가지는 DASP 칩이다. 두 종류의 칩중 TMC57001은 선형위상 FIR필터를 구현하기에 효과적이며, TMS57002는 데이터 지연을 위해 외부 램과 인터페이스를 할 수 있다. 설계한 하드웨어는 PC와의 인터페이스에 통하여 구동되도록 하였는데, PC가 하는 역할은 시스템을 초기화시키는 것으로 시스템 전체를 reset시킨 후 TMC57001과 TMS57002에 각각 프로그램과 계수를 내부 메모리에 loading하는 것이다.

그림 6의 보상시스템을그림 7의 하드웨어 블록도와 비교하여 정리하여 보면 다음과 같다. 먼저 TMC57001A는 입력된

신호에 대한 IIR HPF, LPF의 역할과 낮은 대역에서의 equalizer 역할을 수행하며, 또한 전체 시스템에서의 counter로서 동작한다. TMC57001B는 변위필터와 미분기의 기능을, TMC57001C는 bass-reflex를 고려한 필터의 기능을 수행한다. 그리고, TMS57002는 그외의 모든 나머지 기능들을 담당하게 되는데, 최종적으로는 처리된 신호는 고주파 영역의 신호와 더해져 출력하게 된다.

VI. 결론

본 논문에서는 스피커 입력신호를 디지털적으로 신호처리를 함으로써 스피커에서의 음의 재생과정에서 발생하는 비선형 왜곡 현상을 보상하여 보다 원음에 가까운 음을 얻을 수 있는 방법을 제안하였다.

스피커의 기계적 등가회로부터 스피커의 비선형 운동방정식을 구했으며, 이로부터 저주파 영역에서 비선형 왜곡을 보상하는 시스템을 구현하였다. 비선형 운동방정식의 해로 변위를 구하는 복잡한 방법을 지양하고 선형 방정식으로부터 직접 왜곡보상 시스템을 설계할 수 있는 방법을 제안하였다.

제한한 보상시스템을 실시간으로 처리하기 위해 DASP 칩을 사용하여 하드웨어로 설계하였다. 매우 간단한 회로로 구성하였으므로 저렴한 가격으로 구현할 수 있을뿐만 아니라, 그구조도 간단하여 실시간 처리에 있어서 기존에 제안되었던 다른 방법들에 비하여 유리하다고 생각된다.

참고문헌

[1] Kaizer, A.J.M., "Modeling of the Nonlinear Response of an Electrodynamical Loudspeaker by a Volterra Series Expansion," J.Audio. Eng. Soc., vol.35, No. 6(1987), pp.421-432

[2] Klippel, W., "The Mirror Filter - A New Basis for Reducing Nonlinear Distortion and Equalizing Response in Woofer Systems," J.Audio Eng.Soc., vol.40, No.9(1992), pp 675-691

[3] de Vries, R., A.P.Berkhoff, "Digital Compensation of Nonlinear Distortion in Loudspeakers," Proc. ICASSP 1993, vol.I, pp.165-168.

[4] Birt, D.R., "Nonlinearities in Moving-Coil Loudspeakers with Overhung Voice Coils", J. Audio Eng. Soc., Vol.39, No.4 (1991), pp.219-231.

[5] Mills, P.G.L. and M.O.J.Hawksford, "Distortion Reduction in Moving-Coil Loudspeaker Systems Using Current-Drive Technology", J. Audio Eng. Soc., Vol.37 (1989), pp.129-148.

[6] Hall, D.S., "Design Considerations for an Accelerometer-Based Dynamic Loudspeaker Motional Feedback System", presented at the 87th Convention of the Audio Engineering Society, J. Audio Eng. Soc.(Abstract), Vol.37 (1989), p.1069.

[7] Greiner, R.A. and T.M. Sims,Jr., "Loudspeaker Distortion Reduction", J. Audio Eng. Soc., Vol.32 (1984), pp.956-963.

[8] Klaasen, J.A. and S.H. de Koning, "Motional Feedback with Loudspeakers", Philips Tech. Rev., Vol.29 (1968), pp.148-157.

[9] de Greef, D. and J. Vandeweghe, "Acceleration Feedback Loudspeaker", Wireless World (1981 Sept.), pp.32-36.

[10] De Boer, E., "Theory of Motional Feedback", IRE Trans. Audio (1961 Jan-Feb).

[11] Catrysse, J.A.M., "On the Design of Some Feedback Circuits for Loudspeakers", J. Audio Eng. Soc., Vol.33 (1985), pp.430-435.

[12] Gao, F.X.Y. and W. Martin Snelgrove, "Adaptive Linearization of a Loudspeaker", Proc. ICASSP 1991, pp.3589-3592

[13] Texas Instrument, "TMC57000/TMC57001/TMS57002 User's Guide.", 1992