

# 스피커의 비선형 왜곡을 보정하는 새로운 적응 제어기

권오상\*

A New Adaptive Controller Compensating Nonlinear Distortions of a Speaker

Oh-Sang Kwon\*

요 약

일반적으로 스피커는 설계 원리, 제작 과정 등의 요인에 의하여 비선형 왜곡을 발생하게 되는데, 비선형 왜곡으로 인하여 음질이 떨어지거나 변형하게 된다. 따라서 이러한 비선형 왜곡을 보정하여 스피커를 선형화한다면 보다 향상된 양질의 소리를 청취하거나 만족도를 높일 수 있다.

본 논문에서는 스피커의 비선형 왜곡을 보정하기 위해서 새로운 적응 제어기를 제안하였다. 분석적인 해석과 함께 컴퓨터 모의실험을 통해 기존의 적응 제어기와 제안된 적응 제어기가 모두 비선형 왜곡을 지닌 스피커 시스템을 선형화하는데 적용할 수 있다는 것을 확인하였다. 또한, 제안된 적응 제어기가 거의 동일한 계산량으로 기존의 적응 제어기보다 비선형 왜곡을 보정하는데 빠른 수렴속도와 우수한 성능을 가지고 있다는 사실을 확인하였다.

ABSTRACT

In general, a speaker generates nonlinear distortions owing to a design principle, manufacturing process, and so on, which decreases and changes a sound quality. So, if the speaker is linearized by compensating these nonlinear distortions, the sound quality and satisfaction can be increased.

In this paper, a new adaptive controller was proposed to be applied for compensating nonlinear distortions of a speaker. Through computer simulations as well as the analytical analysis, it could be shown that it is possible for both conventional adaptive controller and proposed adaptive controller, to be applied for linearizing the speaker with nonlinear distortions. Also, the simulations results demonstrated that the proposed adaptive controller may have faster convergence speed and better capability of compensating the nonlinear distortion than the conventional adaptive controller with nearly equal computation complexity.

키워드

Speaker, Adaptive Controller, Nonlinear Distortions, Convergence Speed, Computation Complexity  
스피커, 적응제어기, 비선형왜곡, 수렴속도, 계산 양

## 1. 서론

스피커는 전기 에너지를 소리 에너지로 변환시키는 장치로서 보통 증폭기에서 나오는 전류 신호를 인

간이 귀로 들을 수 있는 음향학적인 신호로 바꾸어 준다. 스피커는 설계 원리, 제작 과정 등 내부에 편재되어 있는 여러 가지 요인에 의하여 비선형성을 나타내기 때문에 신호가 스피커를 통과하면 비선형 왜곡

\* 교신저자(corresponding author) : 남서울 대학교 전자공학과(ckryu@nsu.ac.kr)

접수일자 : 2014. 08. 13

심사(수정)일자 : 2014. 09. 25

게재확정일자 : 2014. 10. 17

이 발생하게 되는데, 비선형 왜곡으로 인하여 우리 인간은 음질이 떨어진 소리를 듣거나 불쾌감을 느끼게 된다. 따라서 이러한 비선형 왜곡을 보상하여 전체적인 스피커 시스템을 선형화한다면 보다 향상된 양질의 소리를 청취하거나 만족도를 높일 수 있다[1-3].

일반적으로 비선형 왜곡을 발생시키는 필터나 시스템을 모델링할 때에는 연속된 함수를 사용한다. 필터의 출력이 필터 계수의 선형적인 결합에 의해 구성되기 때문에 비선형 필터의 특성은 선형 시스템이나 선형 필터와 유사하다[4-5]. 또한, 선형 시스템 분야에서 필터 계수를 보상하는 적응 알고리즘을 그대로 사용할 수 있으며, 그 해석도 선형 시스템과 유사하게 할 수 있다. 따라서 비선형 시스템이나 비선형 필터의 계수를 보상하기 위하여 최소 평균 제곱(Least Mean Square, LMS) 알고리즘이나 최소 제곱(Least Square, LS) 알고리즘 등을 사용할 수 있다. 그러나 비선형 필터의 경우에는 선형 필터와 달리 많은 필터 계수를 사용하기 때문에 계산 양이 증가하고, 수렴속도가 느리게 된다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 많은 연구들이 발표되었지만 여전히 그 해결책은 미진한 상황이다[6-8].

능동소음제어 분야에서는 상당한 크기의 음향학적인 파동이 전파될 때 선형 프로세스로 근사화하여 해석한다. 하지만 전체적인 능동소음제어 시스템은 비선형으로 해석되는데, 그 이유는 비선형성을 가진 소자가 존재하기 때문이다. 가장 대표적인 비선형 소자가 부음원을 발생하는 스피커인데, 특히 저주파수 영역에서 그 정도가 더 심해지게 된다. 따라서 저주파수를 주로 다루는 능동소음제어의 성능을 향상시키기 위해서는 스피커와 같은 비선형 왜곡을 발생시키는 소자들을 선형화하는 것이 필요하다[9].

본 논문에서는 스피커 시스템의 비선형 왜곡을 보상하기 위하여 새로운 적응 제어기를 제안하였으며, 새로운 적응 제어기를 구동하는 적응 제어 알고리즘으로서 양방향 (Bi-directional) 제어 알고리즘을 사용하였다. 일반적으로 적응 제어기를 구동하는데 사용하는 가장 대표적인 알고리즘으로서 최소 평균 제곱 알고리즘을 들 수 있는데, 구현이 간단하고 안정적이며, 수학적으로도 해석이 용이하다. 하지만 전반적으로 수렴속도가 느리고 참조신호를 필요로 하며, 잔여 에너지가 증가하여 제어기가 불안정하게 된다.

또한, 최소 제곱 알고리즘의 경우에는 수렴속도가 빠르지만 상당히 많은 계산 양을 필요로 한다. 따라서 본 논문에서는 계산 양의 증가가 거의 없고, 신호에 대해 미리 측정해야 하는 등의 단점을 없앤 새로운 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘은 그림 1과 같이 역방향 (feed-back) 제어 알고리즘의 폐환 오차신호를 순방향(feed-forward) 제어 알고리즘의 참조신호와 결합한 양방향 (Bi-directional) 알고리즘으로 구성된다. 역방향 제어 알고리즘은 순방향 제어 알고리즘의 단점인 느린 수렴속도를 향상시키거나 상관도가 있는 참조신호를 얻을 수 없을 때 사용한다. 하지만 역방향 제어 알고리즘은 주어진 대역폭에서 제한적인 이득을 얻을 수 있는 이득-대역폭 제한의 단점과 제어기가 불안정하다는 단점이 있다. 이 문제는 전체적인 구조를 순방향 제어 알고리즘의 형식을 따르게 하여 안정적인 알고리즘으로 해결할 수 있다. 또한, 계산 양 측면에서 기존의 알고리즘에 비해 덧셈과 곱셈이 한번 필요할 뿐 많은 계산 량의 증가가 없고, 가중도 파라미터  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 값에 따라 순방향 제어 알고리즘과 역방향 제어 알고리즘의 특성으로 구현이 가능하다는 장점이 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 스피커 시스템의 비선형 모델링에 대해 논하고, III장에서는 양방향 제어 보정기에 대하여 해석하였으며, IV장에서는 스피커의 비선형 왜곡을 선형화하는데 있어 제한한 양방향 보정기의 성능을 모의실험을 통해 증명하였으며, V장에서 결론을 맺었다.

## II. 스피커 시스템의 모델링

스피커는 전기 에너지를 음향학적인 에너지로 변환하는 장치라고 할 수 있다. 실제로 이 변환은 두 가지의 과정을 거치게 되는데, 하나는 전기 신호가 스피커 콘의 기계적인 운동을 유발하는 과정이고, 다른 하나는 첫 번째 과정에 의해 압력의 차로 파동이 발생하여 소리가 발생하는 경우이다. 이때, 스피커에서 발생하는 비선형 왜곡 주된 원인은 서스펜션(Suspension)과 불균일한 자속밀도(Flux Density)이다. 스피커는 300 [Hz] 이상의 주파수 영역에서 전체 고조파 왜곡 (Harmonic Distortion)이 1 [%]로 매우 작으므로 서

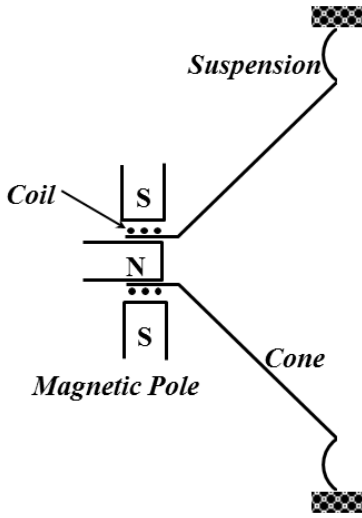


그림 1. 기본적인 직접방사형 스피커의 구조  
Fig. 1 Structure of the basic direct radiator loudspeaker

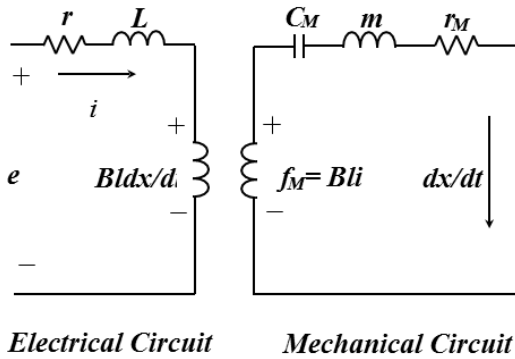


그림 2. 직접방사형 스피커의 등가 회로  
Fig. 2 The equivalent circuits of the basic direct radiator loudspeaker

스펜션 비선형에 의한 영향을 덜 받지만, 저주파수 영역에서는 비선형 왜곡에 의한 영향을 많이 받는다. 주파수가 낮아짐에 따라 서스펜션 비선형에 의한 왜곡이 점점 더 커지게 된다. 예를 들어 비선형 서스펜션을 가진 10 인치 다이내믹 스피커에서는 60 [Hz]에서 2 [W]의 입력에 대해 10 [%]의 고조파 왜곡을 발생시킨다. 즉, 스피커 운동의 크기가 작다면 불균일한 자속밀도에 의해 발생하는 왜곡은 1 [%]미만이지만, 운동의 크기가 크다면 왜곡에 의한 영향은 심각한

다. 이러한 왜곡은 정밀한 설계에 의해 어느 정도 감소되지만 한계가 있으므로 다른 선형화 기법이 필요하다. 이러한 기법들은 주로 적응 알고리즘을 이용하여 비선형 왜곡을 선형화하는데, 사용하는 적응 알고리즘에 따라 그 성능에 차이가 있다.

그림 1은 전기적인 부분과 기계적인 부분으로 구성된 기본적인 직접방사형(Direct Radiator) 스피커이다. 전기적인 부분은 코일로 간단하게 구성되며, 기계적인 부분은 콘, 서스펜션, 에어 로드(Air Load)로 구성된다. 두 부분은 자기장을 통하여 상호작용하게 되는데, 기계적인 부분은 등가의 전기적인 회로로 표현할 수 있다. 따라서 전기적인 부분과 기계적인 부분들이 결합되어 있는 스피커 시스템을 그림 2와 같이 표현할 수 있다. 그림에서  $e$ 는 발전기의 내부 전압이며,  $r$ 은 발전기와 코일의 전체 전기적 저항(Resistance)이다.  $L$ 은 코일의 인덕턴스(Inductance)이며,  $E$ 는 식 (1)과 같이 기계적인 회로에 의해 전기적인 회로에서 발생되는 전압이다.

$$E = Bl \frac{dx}{dt} \tag{1}$$

여기서  $B$ 는 공기 틈(Air Gap)에서의 자속밀도,  $l$ 은 코일 컨덕터의 길이,  $m$ 은 코일과 콘, 그리고 에어 로드의 전체 무게이다. 또한,  $r_M$ 은 전체 기계적 저항을 나타내며,  $C_M$ 은 서스펜션의 컴플라이언스(Compliance)를,  $f_M$ 은 코일에 의해 발생하는 힘이며,  $Bli$ 와 같다. 유사성에 따르면, 기계적인 시스템에서 길이, 질량, 힘, 시간에 상응하는 전기적인 회로에서의 요소는 각각 전하, 인덕턴스, 전압, 시간이다. 이와 같이 기계적인 회로에 대해서 미분 방정식을 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + r_M \frac{dx}{dt} + \frac{x}{C_M} = Bli \tag{2}$$

그림 2에서의 전기적인 회로를 참고하여 위의 (2)식을 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$e = ir + L \frac{di}{dt} + Bl \frac{dx}{dt} \tag{3}$$

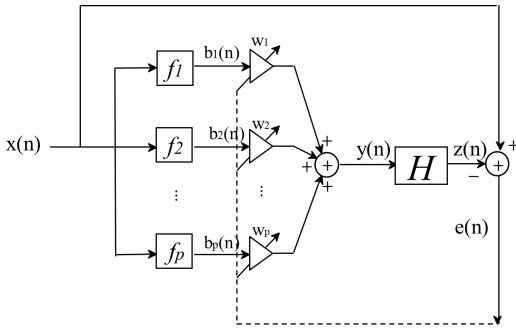


그림 3. 기존 비선형 왜곡 보정기의 구조  
Fig. 3 Structure of conventional nonlinear distortion compensator

일반적으로 코일에서의 힘은 변위에 대하여 비선형 함수이므로 서스펜션 시스템의 컴플라이언스는 상수가 아니라 변위에 대하여 함수이다. 또한, 스피커의 콘 서스펜션 시스템에서 힘의 편향 특성은 일반적으로 식 (4)와 같이 다항식으로 근사화된다.

$$f_M = \epsilon x + \delta x^2 + \gamma x^3 \tag{4}$$

여기서  $f_M$ 은 변위  $x$ 를 유발하는 인가된 힘이다. 그러면 서스펜션 시스템의 컴플라이언스는 식 (5)와 같이 얻을 수 있다.

$$C_M = \frac{x}{f_M} = \frac{1}{\epsilon + \delta x + \gamma x^2} \tag{5}$$

여기서 위의 (5)식을 (1)식에 대입하면 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + r_M \frac{dx}{dt} + \alpha x + \delta x^2 + \gamma x^3 = Bli \tag{6}$$

스피커의 컴플라이언스는 서스펜션이 얼마나 유연한지를 나타내며, 거리를 힘으로 나눈 양,  $[m/M]$  또는  $[cm/dyne]$ 으로 표현한다.

위의 (6)식을 보면, 고주파수 영역에서 미분항이 크므로 비선형의 효과는 작아져서 식 자체가 선형에 가까워지는 반면에 저주파수 영역에서는 미분항이 작아지므로 비선형의 효과는 강해져서 식 자체가 비선형에 가까워진다. 이것이 바로 서스펜션을 가진 스피커 시스템의 왜곡이 저주파수에서 심각한 이유가 된다.

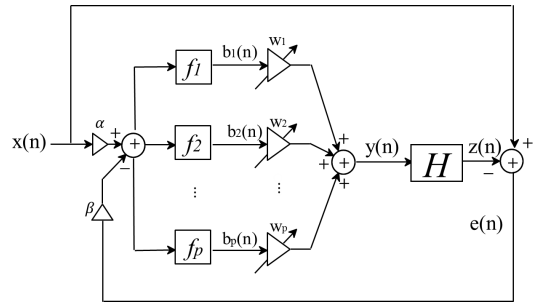


그림 4. 제안된 비선형 왜곡 보정기의 구조  
Fig. 4 Structure of proposed nonlinear distortion compensator

고주파 왜곡의 또 다른 요인은 불균일한 자속밀도인데, 자속밀도는 상수가 아니라 변위  $x$ 에 대한 함수이므로 식 (7)과 같이 근사화하여 표현할 수 있다.

$$B(x) = B_0 + B_1x + B_2x^2 \tag{7}$$

여기서 비선형성은 (2)식과 (3)식에 의해 전기적인 회로와 기계적인 회로에 모두 영향을 준다.

### III. 적응 제어기

스피커 시스템의 비선형 왜곡을 적응 제어기로 보정하기 위한 방법으로는 크게 3가지가 있다. 첫째는 출력 단에서 제거하여 선형화하는 방법, 둘째는 후처리기(Post Processor)를 사용하여 선형화하는 방법, 마지막으로 전처리기(Pre Processor)를 사용하여 선형화하는 방법이 있다. 첫 번째와 두 번째 방법은 스피커를 선형화하는데 부적절한데, 그 이유는 음파가 스피커를 떠난 후 음파 신호를 처리하는 것이 힘들기 때문이다. 따라서 마지막 방법, 즉 전처리기를 사용하여 스피커의 비선형 왜곡을 보정하는 방법을 사용하였다. 전처리기를 사용하여 비선형 왜곡을 보정하는 전체적인 구조는 그림 3과 같다. 메모리가 없는 적응 보정기 또는 전처리기  $W(n)$ 가 비선형 왜곡을 발생시키는 시스템  $H$  전 단계에 위치한다.

본 논문에서 제안한 새로운 적응 보정기는 그림 4와 같다. 이때, 적응 보정기는 비선형 함수의 선형적인 결합으로 구성되며, 입력과 출력과의 관계는 식

(8)과 같이 주어진다.

$$y = \sum_{i=1}^P w_i f_i[x] \quad (8)$$

여기서  $P$ 는 사용된 함수의 개수이며,  $f_i$  ( $i=1,2, \dots, P$ )는 비선형 함수를 나타낸다. 비선형 함수의 출력과 적응 보정기의 계수는 식 (9)부터 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{B}(n) = [b_1(n), b_2(n), \dots, b_P(n)]^T \quad (9)$$

여기서

$$b_m(n) = f_i[\alpha x(n) - \beta e(n)], \quad i = 1, 2, \dots, P \quad (10)$$

$$\mathbf{W}(n) = [w_1(n), w_2(n), \dots, w_P(n)]^T \quad (11)$$

또한, 적응 보정기와 비선형 함수  $H$ 의 출력은 식 (12)와 식 (13)으로 각각 표현할 수 있다.

$$y(n) = \mathbf{W}^T(n) \mathbf{B}(n) \quad (12)$$

$$z(n) = H[\mathbf{W}^T(n) \mathbf{B}(n)] \quad (13)$$

오차신호  $e(n)$ 은 식 (14)와 같이 출력신호  $z(n)$ 와 입력신호  $x(n)$ 의 차로 정의할 수 있다.

$$e(n) = x(n) - z(n) \quad (14)$$

적응 보정기의 최적의 계수 값은 위의 오차신호 분산을 최소화함으로써 구할 수 있다.

$$\frac{\partial E[e^2(n)]}{\partial \mathbf{B}(n)} = \mathbf{0} \quad (15)$$

$$E[H'[\mathbf{W}^T(n) \mathbf{B}(n)] \mathbf{B}(n) [x(n) - H[\mathbf{W}^T(n) \mathbf{B}(n)]]] = \mathbf{0} \quad (16)$$

위의 (16)식에서 비선형 함수  $H$ 의 통계적 특성과 정보를 완전하게 알고 있다면, 비선형 방정식을 풀 수 있지만 일반적으로는 그렇지 않다. 따라서 입력 데이터에 대하여 통계적 기울기 알고리즘을 사용하는 것

이 효과적이다[5].

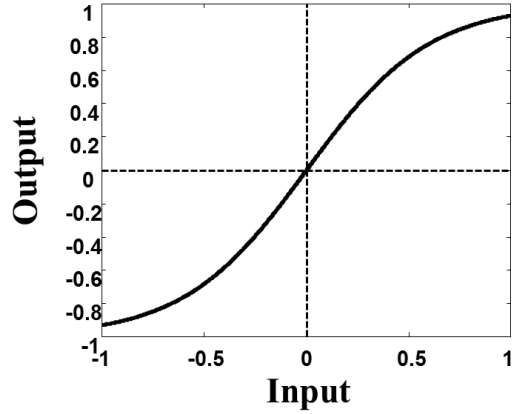


그림 5. 시그모이드 함수의 입력-출력 특성  
Fig. 5 The input-output characteristics of the sigmoid function

$$\mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n) - \mu \nabla_{\mathbf{n}} \quad (17)$$

여기서  $\mu$ 는 수렴과 안정성을 결정하는 양의 상수이며,

$\nabla_{\mathbf{n}}$ 은 기울기 벡터의 추정된 값이며, 식 (18)과 같이 정의된다.

$$\nabla_{\mathbf{n}} = \frac{\partial e^2(n)}{\partial \mathbf{W}(n)} = -H'[\mathbf{W}^T(n) \mathbf{B}(n)] e(n) \mathbf{B}(n) \quad (18)$$

위의 (17)식에서 (18)식으로부터 계수에 대한 보정식이 식 (19)와 같이 만들어진다.

$$\mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n) + \mu H'[\mathbf{W}^T(n) \mathbf{B}(n)] \mathbf{B}(n) e(n) \quad (19)$$

여기서  $H'$ 은 비선형 함수  $H$ 의 미분 값이며, 최적의 값을 추정하는 것은 어렵다. 따라서 다음의 경우를 가정하여 추정한다. 만약에 식 (20)과 같이 비선형 함수의 기울기 함수  $H'$ 이 입력의 크기 범위 ( $a, b$ )에서 항상 양이라면

$$H'[y] > 0, \quad a < y < b, \quad (20)$$

위의 (18)식에서 알 수 있듯이 기울기 방향이

$B(n)e(n)$ 에 의해 결정되며,  $\mu'$ 으로  $\mu H'$ 을 대체한다면 식 (21)이 만들어진다.

$$W'(n+1) = W'(n) + \mu' B(n)e'(n) \quad (21)$$

여기서  $e'(n)$ 은  $W'(n)$ 에 의해 생기는 오차이다. 위의 (21)식에서 함수  $H'$ 은 사용되지 않으며, 비선형 함수  $H$ 를 추정할 필요도 없으므로 필터 계수에 대한 보정식은 기존의 LMS 알고리즘의 보정식과 동일하다. 실제적으로 (20)식의 조건은 포화 특성을 가진 비선형 소자와 같은 많은 비선형 시스템에서 만족되므로 (21)식의 간소화된 보정식을 사용하여 비선형 시스템을 선형화하는데 사용할 수 있다.

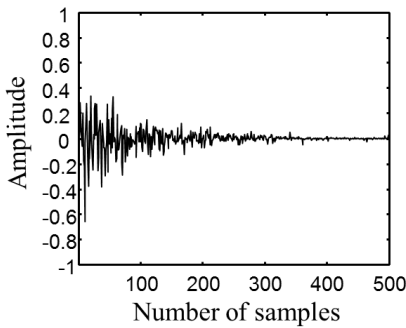


그림 6. 기존의 적응 보정기를 사용할 때의 비선형 왜곡 감쇠에 대한 평균 표본 오차신호  
 Fig. 6 The mean sample error signal of nonlinear distortion attenuation using the conventional adaptive compensator

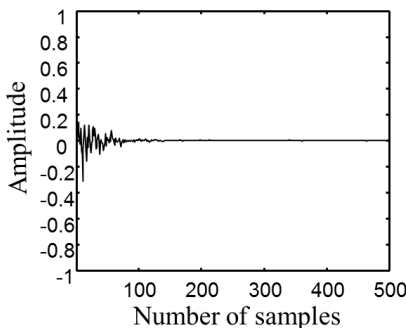


그림 7. 제안된 적응 보정기를 사용할 때의 비선형 왜곡 감쇠에 대한 평균 표본 오차신호  
 Fig. 7 The mean sample error signal of nonlinear distortion attenuation using the proposed adaptive compensator

#### IV. 모의 실험

모의실험을 위해 시그모이드(Sigmoid) 함수를 비선형 왜곡을 발생시키는 시스템  $H$ 로 사용하였다. 시그모이드 함수는 앞 절에서 설명한 포화상태를 가진 비선형 모델로서 비선형 시스템을 응용할 때 많이 사용하는 함수이다. 따라서 스피커에서 발생하는 비선형 왜곡 모델로서 시그모이드 함수를 사용하고, 제안된 적응 보정기를 전처리기로 사용하여 시그모이드 함수의 비선형 왜곡을 보정하였다. 시그모이드 함수 모델의 입력과 출력 관계식은 식 (22)와 같이 정의되며, 그림 5와 같이 나타낼 수 있다.

$$H(y) = A \frac{1 - e^{-x/B}}{1 + e^{-x/B}} \quad (22)$$

여기서  $A$ 와  $B$ 는 스케일링 파라미터로서 각각 1과 0.3의 값을 사용하였다. 시그모이드 함수는 기함수의 특성을 가지므로 비선형 왜곡을 보정하기 위한 적응 보정기는 식 (23)과 같이 기함수들로 구성된 테일러(Taylor) 함수를 사용할 수 있다.

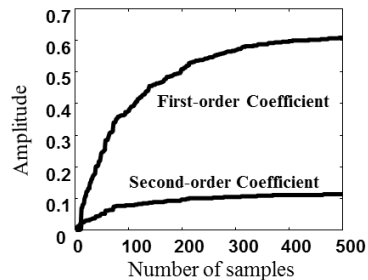


그림 8. 기존 적응 보정기에 대한 계수 평균 궤적  
 Fig. 8 The mean trajectories of coefficients for the conventional adaptive compensator

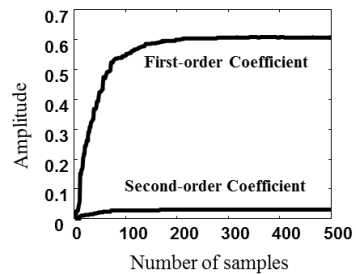


그림 9. 제안된 적응 보정기에 대한 계수 평균 궤적  
 Fig. 9 The mean trajectories of coefficients for the proposed adaptive compensator

$$y(n) = w_1(n)x(n) + w_2(n)x^3(n) \quad (23)$$

입력신호로서는 식 (24)와 같이 균일하게 분포된 임의(Random) 신호를 사용하였다.

$$p(x) = \frac{1}{2}, \quad -1 < x < 1 \quad (24)$$

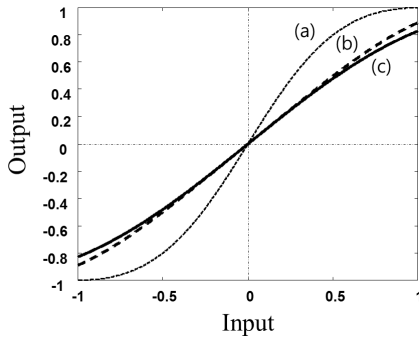


그림 10. 정상상태에서의 선형화 정도 (a) 보정 전의 시그모이드 함수 (b) 기존의 적응 보정기 (c) 제안된 적응 보정기

Fig. 10 Linearization level in the steady state (a) Sigmoid function before compensation (b) conventional adaptive compensator (c) proposed adaptive compensator

기존의 적응 보정기와 제안된 적응 보정기의 성능 비교를 위해 동일한 환경 하에서 여러 번 수행한 결과의 평균을 비교하였다.

그림 6과 그림 7은 각각 기존의 적응 보정기와 제안된 적응 보정기를 사용하여 비선형 왜곡을 감소시킨 결과를 오차신호로 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 제안된 적응 보정기의 수렴속도가 기존의 적응 보정기에 비해 약 4-5배 빠름을 알 수 있다.

그림 8과 그림 9는 각각 기존의 적응 보정기와 제안된 적응 보정기 계수 값의 궤적을 나타낸 것이다. 양쪽의 적응 보정기에서는 모두 두 개의 항으로 이루어진 테일러 함수를 사용하였으므로 두 개의 계수에 대하여 나타내었다. 그림에서 기존의 적응 보정기의 1차 계수 값은 0.6192로 수렴해 가며, 3차 계수 값은 0.1257로 수렴해 감을 알 수 있다. 또한, 제안된 적응 보정기의 1차 계수 값은 0.6070로 수렴해 가며, 3차

계수 값은 0.0322로 수렴해 감을 알 수 있다. 양쪽의 적응 보정기에서 1차 계수 값은 비슷하지만, 3차 계수 값에서 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 수렴속도 측면에서 살펴보면 기존의 적응 제어기는 500표본 정도에서 정상상태에 도달하는 반면에 제안된 적응 제어기는 100표본 정도에서 정상상태에 도달함을 알 수 있다. 즉, 제안된 적응 제어기의 수렴속도가 기존의 적응 제어기보다 약 5배 빠르다는 사실을 알 수 있다.

그림 10은 양쪽의 적응 보정기가 정상상태에 도달하였을 때의 비선형 왜곡을 선형화한 정도를 나타낸 것이다. 그림에서 (a) 곡선은 선형화하기 전의 비선형 왜곡을 나타내며, (b) 곡선은 기존의 적응 보정기를 사용하여 선형화한 결과를 나타내며, (c) 곡선은 제안된 적응 보정기를 사용하여 선형화한 결과를 나타낸다. 정상상태에서의 결과이기 때문에 양쪽의 적응 보정기를 사용한 결과가 유사하며, 그리 큰 차이를 보이지 않는다. 다만 제안된 적응 보정기가 기존의 적응 보정기보다 매우 빠른 수렴속도로 정상상태에 도달한다는 사실을 확인할 수 있었다.

## V. 결론

본 논문에서는 일상생활 등에서 많이 사용하는 일반적인 스피커 시스템의 비선형 왜곡을 보정하기 위해서 새로운 적응 제어기를 제안하였다. 스피커는 실제 원리, 제작 과정 등 내부에 편재되어 있는 여러 가지 요인에 의하여 비선형성을 나타내기 때문에 신호가 스피커를 통과하면 비선형 왜곡이 발생하게 되는데, 이러한 비선형 왜곡을 저감함으로써 보다 향상된 양질의 소리를 청취하거나 만족도를 높일 수 있다. 수학적 도출과 컴퓨터 모의실험을 통해 기존의 적응 제어기와 제안된 적응 제어기가 모두 비선형 왜곡을 지닌 스피커 시스템을 선형화하는데 적용할 수 있다는 것을 확인하였으며, 제안된 적응 제어기가 거의 동일한 계산 양으로 기존의 적응 제어기보다 비선형 왜곡을 보정하는데 빠른 수렴속도와 우수한 성능을 가지고 있다는 사실을 확인하였다. 끝으로 제안한 적응 보정기는 스피커의 비선형 왜곡을 보정하는데 사용할 수 있을 뿐 아니라 다양한 비선형 소자나 비선형 시스템에 적용할 수 있다.

## References

- [1] Y. Gong, "A Method of Joint Compensation of Additive and Convolutional Distortions for Speaker-Independent Speech Recognition," *IEEE Trans. Speech and Audio Processing*, vol. 13, no. 5, Sept. 2005, pp. 975-983.
- [2] C. Lee and D. Kim, "Adaptive Noise Reduction of Speech Using Wavelet Transform," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 4, no. 3, 2009, pp. 190-196.
- [3] J. Choi, "Speech and Noise Recognition System by Neural Network," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 5, no. 4, 2010, pp. 357-362.
- [4] G. R. Arce, *Nonlinear Signal Processing*. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2005.
- [5] S. Martin, *The Volterra and Wiener theories of nonlinear systems*. New York: Wiley, 2006.
- [6] W. Ji and W. Gan, "Identification of a parametric loudspeaker system using an adaptive Volterra filter," *Applied Acoustics*, vol. 73, 2012, pp. 1251-1262.
- [7] L. P. Hecka, Y. Konigb, M. K. Sönmez, and M. Weintrauba, "Robustness to telephone handset distortion in speaker recognition by discriminative feature design," *Speech Communications*, vol. 31, issues. 2-3, June 2000, pp. 181-192.
- [8] T. Ishikawa, K. Nakashima, Y. Kajikawa, and Y. Nomura, "A Consideration on Elimination of Nonlinear Distortion of the Loudspeaker System by Using Digital Volterra Filter," *Electronics and Communications in Japan, Part 3*, vol. 83, no. 2, 2000, pp. 110-118.
- [9] C. Lee and C. Lee, "Radiational characteristics of speaker directivity using active control," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 7, no. 1, 2012, pp. 27-31.

## 저자 소개



### 권오상(Oh-Sang Kwon)

1992년 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사)

1994년 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

1999년 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)

1999년~2003년 삼성전자 책임연구원

2005년~현재 고려사이버대학교 전기전자공학과 교수

※ 관심분야 : 통신, 멀티미디어, 신호처리