

적응필터 알고리즘을 이용한 스피커의 왜곡을 측정

김 천 덕 · 지 석 근*

부산수산대학교 전기공학과, *군산대학교 통신공학과
(1994年 4月 9日 接受)

Measurement of Distortion Level of Loudspeaker using Adaptive Filter Algorithm

Chun - Duck KIM and Suk - Kun JEE*

National Fisheries University of Pusan, Dept. of Electrical Engineering

*Kunsan university, Dept. of Communication

(Received April 9, 1994)

This paper describes a method to measure the distortion level of loudspeaker using a LMS(Least Mean Square) adaptive filter. Conventional technique to measure the distortion level uses a band-pass filter with a sharp cut-off frequency characteristics. However, such the band-pass filter has a bad time response characteristics. On the other hand, the proposed method offers us an easy way to measure the specified harmonic distortion level with a small hardware. Moreover, our method is not affected by noise which has no correlation with the test signal, and the measurement can be carried out in a noisy environment. The effectiveness of the proposed method is confirmed by experiment using a loudspeaker in a noisy room.

서 론

최근 적응필터 이론과 DSP 프로세서의 발달과 함께 적응 디지털 신호처리에 관한 연구가 진행되고 있다^{1),2),3)}. 적응 필터 시스템은 변화하는 환경 또는 시스템의 변화하는 요구에 의하여 자동적으로 제어할려는 신호의 역위상을 만들어 그 차의 에러신호를 감소해 나가는 방법으로 최적계수를 축차적으로 수정해나가는 LMS 알고리즘은 Widrow & Hoff³⁾가 제안한것으로 현재까지도 널리 사용되고 있다. 이 분야의 응용의 대부분은

능동소음제어로서 피드 포워드 제어방식이고, 소음원 주변에 소음제거용 스피커를 설치하여 작업 환경소음을 감소하거나⁸⁾, 전화나 환풍기등의 에코음을 줄이는 연구이다⁹⁾.

이 논문에서는 LMS알고리즘의 원리를 이용하여 스피커나 앰프 등의 음향기기의 왜곡율이나 잔유잡음 레벨을 측정하려고 한다. 음향기기의 제품검사는 제품의 주파수 왜곡율이나 잔유잡음 측정으로 수행된다⁴⁾. 종래의 제품검사에는 초저왜곡율의 정현파 발진기와 대역통과 필터가 사용되어 왔지만, 충분한 주파수 분해능과 적합한 시간응답

특성을 갖는 대역통과 필터의 구현에서 가격이 고가일 뿐만 아니라, 고조파 왜곡을 성분마다 측정하는 것은 불가능하고, 스피커의 측정과 같은 현상소음이 문제가 되는 경우에는 무향실내에서 측정하여야 하는 환경이 필요하다. 본 논문에서는 이러한 전통적인 검사방법의 제한점을 보완하기 위해 LMS 적응 필터 기법을 스피커의 왜곡을 특성해석에 적용하고 측정실험을 통하여 그 유효성을 확인하였다.

적응필터를 사용한 왜곡을 측정의 원리

Fig. 1은 적응 디지털 필터의 기본구성으로서⁵⁾ 적응 선형결합기를 나타낸다. Fig. 1에서 입력신호와 희망응답 사이의 오차에 대응되는 적응필터계수를 구하여 계산적 응답이 희망하는 응답이 되도록하여 그 차의 신호를 감소하여 간다.

Fig. 2는 단일 입력형의 적응 선형 결합기이다. 입력 데이터 벡터 X_k 와 희망응답 d_k 의 오차는 가변 탭(필터 계수)에서 일정한 시간간격으로 특정 알고리즘에 따라 조정된다. 이 특정 알고리즘은 자승평균오차(MSE : mean-square error)를 최소로 하는 방향으로 필터의 계수를 조절하는 적응방법이다^{5), 6)}.

Fig. 2에서 응답 y_k 와 희망응답 d_k 의 오차 ϵ_k 는 식(1)과 같다.

$$\epsilon_k = d_k - y_k = d_k - X_k^T W_k \quad (1)$$

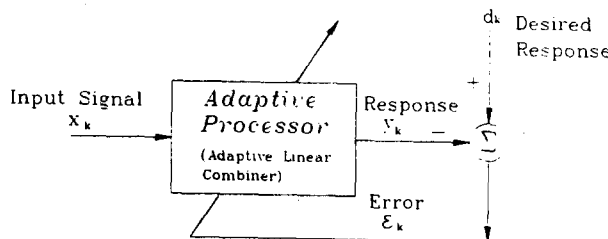


Fig. 1. Fundamental composition of adaptive digital filter.

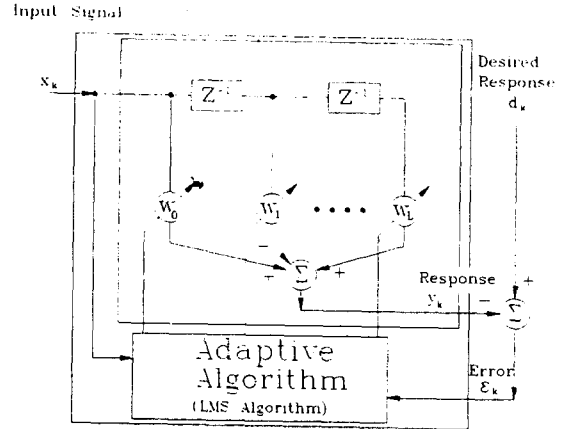


Fig. 2. Adaptive Digital Combiner.

여기서 $X_k = [x_{k0}, x_{k-1}, \dots, x_{k-L}]$, $W_k = [w_{0k}, w_{1k}, \dots, w_{Lk}]$, 그리고 k 는 샘플의 시간을 나타낸다. 자승평균오차 $E[\epsilon_k^2]$ 는 ϵ_k, d_k, X_k 가 정상상태일 때 식(2)와 같이 전개된다.

$$E[\epsilon_k^2] = E[d_k^2] + W^T E[X_k X_k^T] W - 2E[d_k X_k^T] W \quad (2)$$

$E[\cdot]$ 는 $[\cdot]$ 의 기대치를 나타낸다. 입력상관행렬 R 과 희망응답과 입력간의 상관 벡터 P 를 다음과 같이 정의한다.

$$R = E[X_k X_k^T], \quad P = E[d_k X_k^T] \quad (3)$$

자승평균오차 $E[\epsilon_k^2]$ 을 J 로 나타내고 식(3)의 관계식을 이용하면 식(2)는 다음식으로 주어진다.

$$MSE = J = E[d_k^2] + W^T R W - 2P^T W \quad (4)$$

위 식과 같이 자승평균오차는 탭의 2차함수이고 그것은 기본적으로 정상치 2차방정식으로 주어진다. 자승평균오차는 동작 곡면 W 에 관한 J 의 도함수(기울기 ∇)가 0이 되는 점에서 최소값 J_{min} 이 되고 ∇ 은 다음 식과 같이 주어진다.

$$\nabla = \partial J / \partial W = [\partial J / \partial w_0 \quad \partial J / \partial w_1 \quad \dots \quad \partial J / \partial w_L]^T = 2RW - 2P \quad (5)$$

여기서 ∇ 을 0으로 놓고 W 에 관해서 해를 풀면 최적 탭 W^* 는 다음식과 같이 결정된다.

$$W^* = R^{-1}P \quad (6)$$

이 최적인 탭값을 가질 때의 자승평균오차, 즉, 최소치 J_{min} 은 다음 식(7)과 같이 나타난다.

$$J_{min} = E(d_k^2) - P^T R^{-1} P = E(d_k^2) - P^T W^* \quad (7)$$

또한 임의의 시간 k 에서 자승평균오차의 탭에 의한 변화율 ∇_k 는 다음식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} \nabla_k &= \frac{\partial e_k^2}{\partial W_k} = 2e_k \frac{\partial e_k}{\partial W_k} = 2e_k \begin{vmatrix} \frac{\partial e_k}{\partial W_0} \\ \dots \\ \frac{\partial e_k}{\partial W_L} \end{vmatrix} \\ &= -2e_k X_k \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)의 ∇_k 를 사용하여 LMS알고리즘을 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} W_{k+1} &= W_k + \mu(-\nabla_k) \\ &= W_k + 2\mu e_k W_k \end{aligned} \quad (9)$$

식(9)와 같이 적응 필터는 오차신호가 최소가 되도록 필터계수를 자동적으로 수정한다. 바꾸어 말하면, 참조신호와 상관성이 있는 성분이 제거되고 상관성이 없는 신호만이 오차신호로서 남는다. 이 논문에서 고찰하는 방법에서는 참조신호로서 초저왜곡율의 정현파신호를 사용하여 하나의 고조파성분을 측정하는 경우에는 필터의 탭 수를 2개로 하여도 가능하게 된다.

1. 단일 N차 고조파 성분의 측정

이 경우, Fig. 3에 나타낸 바와 같이 적응 필터의 참조신호는 시험신호로 사용한 정현파신호의 N배인 고조파 정현파 발진기를 사용하고 Fig. 2의 희망응답은 피측정기의 출력신호 $y(t)$ 가 된다. 이 때, 적응필터의 출력신호 $z(t)$ 에는 피측정기의 출력중에서 참조신호와 상관성이 있는 성분, 즉 N배의 고조파 성분만이 나타난다. 또, 오차신호 $e(t)$ 에서는 이 N배의 고조파성분만이 제거된 신호가 얻어진다. 따라서, 적응 필터의 출력신호 레벨에 대한 오차의 출력 레벨이 N차 고조파 왜곡율을 나타내는 것이 된다.

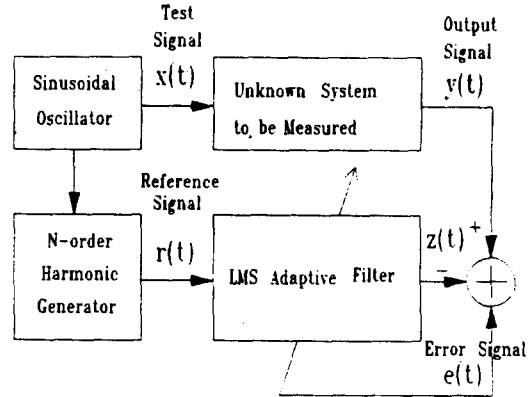


Fig. 3. Block-diagram for measuring the singular N-order harmonic frequency.

2. 전체 고조파 왜곡율의 측정

이 경우, Fig. 4에 나타낸 바와 같이 적응 필터의 참조신호 $r(t)$ 를 시험신호 $x(t)$ 와 같은 정현파신호를 사용한다. 이 때, 적응 필터의 출력신호 $z(t)$ 에는 피측정기의 출력중, 참조신호와 상관성이 있는 성분만이 즉, 기본파 성분만이 나타난다. 또, 오차신호 $e(t)$ 에서는 이 기본파 성분만이 제거된 신호가 얻어진다. 따라서 적응 필터의 출력레벨에 대한 오차신호의 레벨은 피측정기의 시험신호에 대한 전체 고조파 왜곡율 성분과 잡음성분이 포함된 왜곡율이 된다.

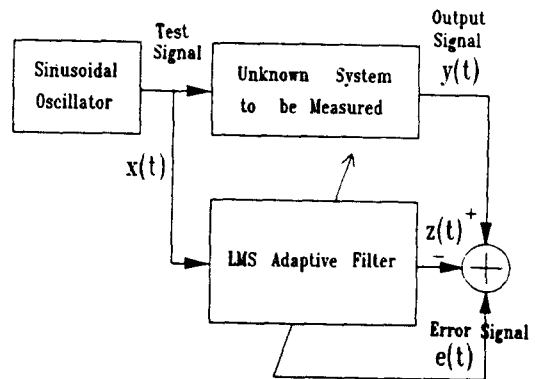


Fig. 4. Block-diagram for measuring distortion of the entire harmonics when included noise.

실 험

1. 예비실험(LMS 알고리즘 구현 실험)

피측정기기의 입력신호 발생기로 제작한 DSP 보드에서 정현파신호를 만들고, 피측정기기의 출력신호로서 기본주파수와 같은 구형파신호를 같은 DSP 보드로 합성하였다. 측정의 블록도는 Fig. 4와 같다.

여기서 제작한 DSP 보드는 32bit 부동소수점 DSP 보드로서 모뎀롤라사의 DSP 96002⁷⁾를 사용하고 있다. 또, 8ch의 A/D 변환기 및 4ch의 D/A 변환기와 16bit 정밀도, 최대 샘플링 주파수 50kHz이고, anti-aliasing 필터로서 각각 차단 주파수가 가변인 5차의 체비셰프 필터(Chebyshev filter)가 포함되어 있다. 실험에서 샘플링 주파수는 8kHz로 하였고, 피측정기기의 입력신호 기본주파수는 7.52Hz로 하여 실험하였다.

Fig. 5(a), (b), (c), (d)는 각각 피측정기기의 출력신호 $y(t)$, 피측정기기의 입력신호 $x(t)$, 참조 신호로서 기본정현파 신호를 사용할 때의 오차신호 $e(t)$, 적응 필터의 출력신호 $z(t)$ 이다. 또

ONO SOKKI FFT ANALYZER CF-903 series
500Hz A:AC/ 2V B:AC/ 2V INST: 3/16 DUAL 1k

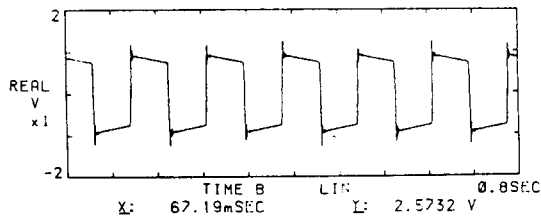


Fig. 5.(a) The output signal $y(t)$ of the system.

ONO SOKKI FFT ANALYZER CF-903 series
500Hz A:AC/ 2V B:AC/ 2V INST: 3/16 DUAL 1k

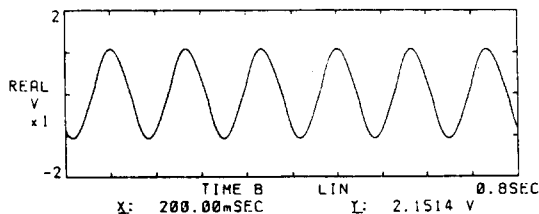


Fig. 5.(b) The input signal $x(t)$ of the system.

Fig. 6(a), (b), (c)는 각각 피측정기기의 출력신호의 스펙트럼 $Y(w)$, 적응 필터의 출력신호의 스펙트럼 $Z(w)$, 참조신호로서 기본정현파 신호를 사용할 때의 오차신호의 스펙트럼 $E(w)$ 이다. Fig. 5(a), (c)에서는 적응 필터에 의해 기본과

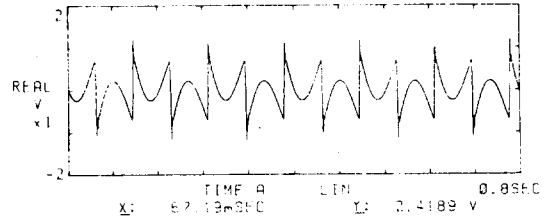


Fig. 5.(c) The error signal $e(t)$ when using fundamental sinusoidal wave as reference.

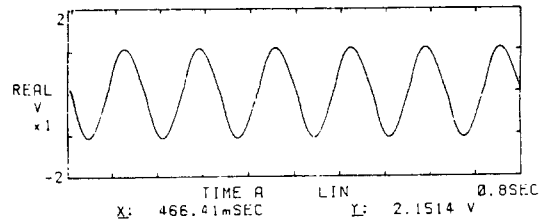


Fig. 5.(d) The output signal $z(t)$ of LMS filter when using fundamental sinusoidal wave as reference.

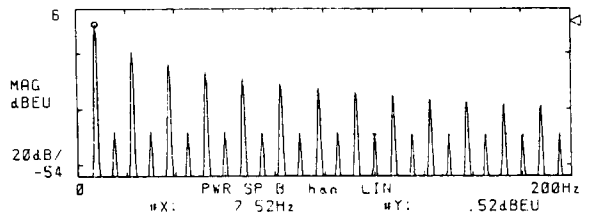


Fig. 6.(a) The spectrum $Y(w)$ of output signal $y(t)$.

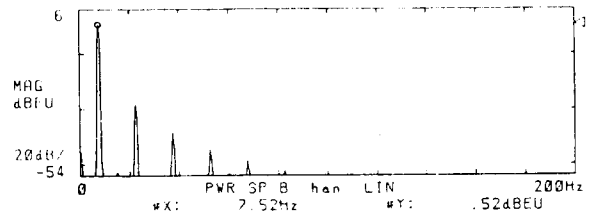


Fig. 6.(b) The output spectrum $Z(w)$ of LMS filter.

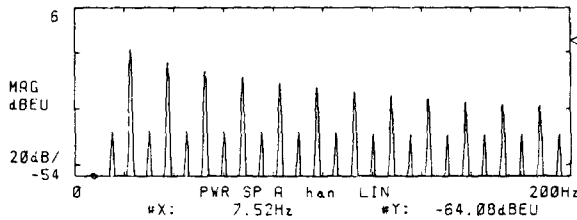


Fig. 6.(c) The error spectrum $E(t)$ when using fundamental sinusoidal wave as reference.

성분이 완전하게 제거되었다는 것을 알 수 있다. 따라서, 왜곡율은 신호 $z(t)$ 와 신호 $e(t)$ 의 파워 비를 계산함에 의해 측정할 수가 있다.

2. 스피커를 사용한 실험

예비실험에 사용한 것과 같은 장치를 사용하여 위크스테이션등의 잡음원이 다수 존재하는 실내에서 스피커의 고조파 왜곡율을 측정하는 실험을 했다. 측정조건은 이하와 같다.

샘플링 주파수 : 8kHz

오차측정용 마이크로폰 : Rion(주) 소음계 사용

스피커 : BOSE Model 101MM, 제작한 스피커 스피커와 마이크로폰사이의 거리 : 55cm

음압레벨 : 70dB(C)

2.1 고조파 왜곡율의 측정

Fig. 7에 스피커로부터 음이 나오지 않을 때의 오차측정용 마이크로폰 출력의 스펙트럼을 나타낸다. 또, Fig. 8(a), (b), (c), (d)에 시험신호로서 200Hz의 정현파를 사용하고 참조신호로서 제2차 고조파인 400Hz의 정현파를 사용하는 경우의 마이크로폰 출력신호의 스펙트럼 $D(w)$.

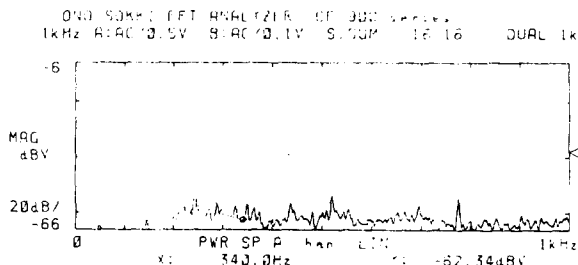


Fig. 7. The output spectrum of error microphone when no sound from loudspeaker.

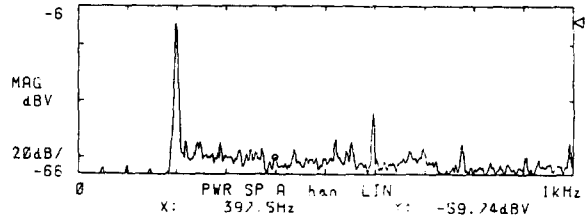


Fig. 8.(a) The output spectrum $D(w)$ of microphone when using 200Hz sine wave as test signal and using 2-order harmonic of 400Hz sine wave as reference signal.

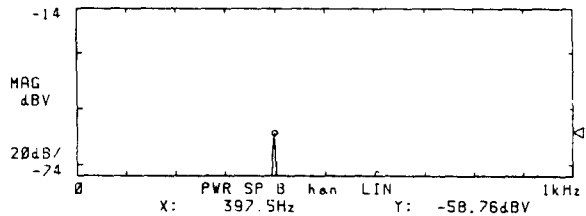


Fig. 8.(b) The output spectrum $Z(w)$ of adaptive filter when using 200Hz sine wave as test signal and using 2-order harmonic of 400Hz sine wave as reference signal.

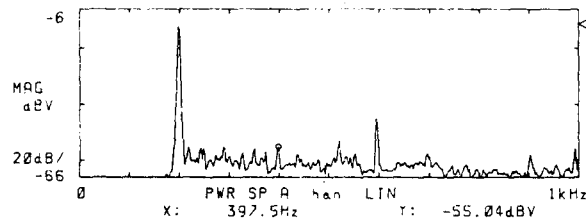


Fig. 8.(c) The error spectrum $E(w)$ when using 200Hz sine wave as test signal and using 2-order harmonic of 400Hz sine wave as reference signal.

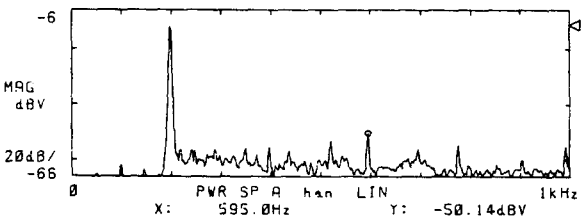


Fig. 9.(a) The output spectrum $D(w)$ when using 200Hz sine wave as test signal and using 3-order harmonic of 600Hz sine wave as reference signal.

적용 필터의 출력신호 스펙트럼 $Z(w)$, 오차신호 스펙트럼 $E(w)$ 을 나타냈다. 여기에서 400Hz 성분의 레벨이 적용 필터의 출력신호는 -58.8dB, 마이크로폰 출력신호는 -55.8dB, 오차신호의 스펙트럼은 -59.7dB이라고 하는 것은 실제의 제 2차 고조파 레벨은 -58.8dB에서 나머지는 참조파 신호와 상관이 없는 암소음을 나타낸다. 이것 으로부터 측정환경은 특별히 선택하지 않아도 된다는 것을 알 수 있다. 또한 마이크로폰 출력신호

에서 기본파 성분의 레벨은 -13.8dB이므로 왜곡율은 -44.9dB인 것도 알 수 있다. Fig. 9(a), (b), (c)에 참조신호로 제3차 고조파인 600Hz의 정현파 신호를 사용할 때의 결과를 나타낸다. 이 경우, 고조파 레벨은 -13.7dB와 -45.0dB의 차인 -31.2dB이라는 것을 알 수 있다.

Table 1.2에 기본주파수와 스피커의 종류를 바꾸어 실험한 결과를 정리하였다. 이 실험에서는 잡음을 포함한 전체 고조파 왜곡을 측정하고 있지

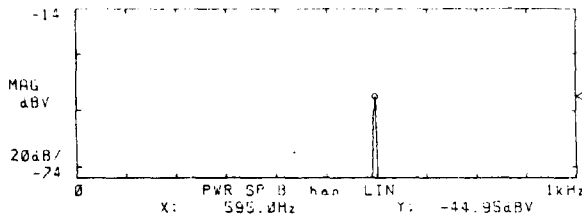


Fig. 9.(b) The output spectrum $Z(w)$ of adaptive filter when using 200Hz sine wave as test signal and using 2-order harmonic of 600Hz sine wave as reference signal.

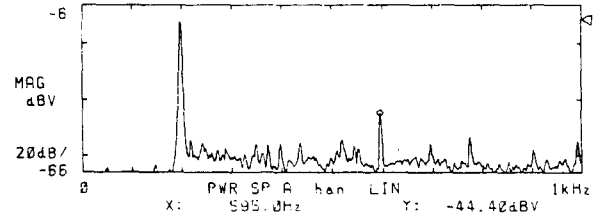


Fig. 9.(c) The error spectrum $E(w)$ when using 200Hz sine wave as test signal and using 2-order harmonic of 600Hz sine wave as reference signal.

Table 1. The results of harmonic distortion

		스피커 #1(BOSE model 101MM)
기본주파수 200Hz	제2차 고조파 왜곡율	-44.9dB
	제3차 고조파 왜곡율	-31.2dB
기본주파수 170Hz	제2차 고조파 왜곡율	-32.6dB
	제3차 고조파 왜곡율	-32.4dB
기본주파수 150Hz	제2차 고조파 왜곡율	-25.5dB
	제3차 고조파 왜곡율	-41.4dB
	제4차 고조파 왜곡율	-53.5dB

Table 2. The results of harmonic distortion

		스피커 #2(제작한 스피커)
기본주파수 200Hz	제2차 고조파 왜곡율	-42.3dB
	제3차 고조파 왜곡율	-51.2dB
기본주파수 170Hz	제2차 고조파 왜곡율	-38.1dB
	제3차 고조파 왜곡율	-55.7dB
기본주파수 150Hz	제2차 고조파 왜곡율	-26.0dB
	제3차 고조파 왜곡율	-59.9dB
	제4차 고조파 왜곡율	-51.8dB

않지만, 이것은 암소음이 있기 때문에 피측정기기만의 왜곡을 측정할 수 없기 때문이다. 그러나 앰프의 경우에는 암소음이 없으므로 측정이 가능할 것이다.

결 론

이 논문에서는 LMS 적응 필터를 사용하여 간편하게 스피커나 앰프 등의 음향기기의 왜곡을이나 잔유잡음 레벨을 측정하는 방법을 제안하였다. 이 방법에 의하면 첨예한 차단 주파수특성을 갖는 대역 필터를 사용하지 않고 적응필터 알고리즘을 사용하여 음향기기중 스피커의 왜곡을 측정하였다. 실험 시스템에서 디지털 프로세서는 32비트 DSP96002를 사용하였고, 8ch의 16비트 A/D 변환기와 4ch의 D/A변환기, 최대 샘플 주파수 50kHz인 5차 체비세프 필터로서 구성하였다. 스피커의 고조파 왜곡을 측정에서 200Hz 정현파를 시험신호로하고, 제 2고조파인 400Hz, 그리고 제 3고조파인 600Hz 정현파를 참조신호로 사용하여 왜곡을 측정하였다. 측정한 결과 고조파 왜곡에 대해 높은 정밀도로 나타났다. 측정시 잡음을 포함한 종합 왜곡을 측정하기 위해서는 환경 소음이 적어야 하지만, 스피커를 사용한 실험에서는 환경소음이 있더라도 고조파 왜곡을 측정할 수 있다는 것을 실험으로서 확인되었다. 제안된 기법은 음향 앰프의 고조파 왜곡을 측정에 응용될수도 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1) J. Kuyama(1992) : Application Tech-

niques of adaptive filters(2), J. Acoust. Soc. Jpn. 48 - (7), 509 - 512.
 2) B. Widrow and S. D. Sterns(1985) : Adaptive Signal Processing, Prentice-Hall, 3-116.
 3) S. Haykin(1991) : Adaptive Filter Theory, Prentice-Hall, 299 - 356.
 4) K. Kito(1984) : FFTアナライザ活用マニュアル, 三報社, 189-198.
 5) Hareo Hamada(1989) : アダプティブフィルタの基礎(その 1), 日本音響學會誌, 45-8, 624-630.
 6) Hareo Hamada(1989) : アダプティブフィルタの基礎(その 2), 日本音響學會誌, 45-9, 731-738.
 7) MOTOROLA(1991) : DSP 96002 User's Manual, MOTOROLA Inc.
 8) S. J. Elliott & I. M. stothers & P. A. Nelson(1987) : A multiple error LMS algorithm & its application to the active control of sound and vibration, IEEE Trans. Acoust. ASSP - (35), 1423-1434.
 9) M. M. Sondhi and A. J. Presti(1966) : A self-adaptive echo canceller, Bell Syst. Tech. J. 45. 1851-1854.