

FxLMS를 이용한 단일 센서기반 능동 반향음 제어 시스템

A single sensor based active reflection control system using FxLMS algorithm

김재필,¹ 지유나,¹ 박영철,^{1†} 서영수²

(Jaepil Kim,¹ Youna Ji,¹ Young cheol Park,^{1†} and Young soo Seo²)

¹연세대학교 멀티미디어 신호처리 연구실, ²국방과학연구소

(Received November 14, 2016; accepted January 25, 2017)

초 록: 본 논문에서는 FxLMS(Filtered-x Least Mean Square) 알고리즘을 이용한 단일 센서 기반의 능동 반향음 제어 알고리즘을 제안한다. 제안 알고리즘은 먼저 단일 센서 입력 신호로부터 입사음과 반향음을 분리하고, 분리된 신호들을 사용하여 반향음과 반대 위상을 갖는 제어 신호를 생성한다. 제어 신호는 센서 위치에서 반향음과 중첩되어 반향음의 음압을 감소시킨다. 적절한 신호 분리를 위해 반향음 경로와 제어 음향 경로가 필요하며 이는 swept sine 신호를 이용해 측정된 음향 응답으로부터 사전에 구할 수 있다. 효용성을 검증하기 위해 DSP(Digital Signal Processing) 보드를 사용하여 제안된 알고리즘을 실시간으로 구현하였으며, 공기 중 음향 덕트 환경에서 1 kHz 버스트 신호에 대해 반향음이 11.6 dB 감소함을 확인 하였다.

핵심용어: 능동소음제어, 경로 분리, 소나 시스템, 능동 반향음 제어, FxLMS (Filtered-x Least Mean Square)

ABSTRACT: This paper presents an active acoustic-reflection control algorithm based on a single sensor. The proposed algorithm operates in a system comprising a single sensor located nearby the reflective surface and a control transducer mounted on the reflective surface. First, the incident and reflected acoustic signals are separated from the sensor signal, and a control signal is generated using the separated signals. For the signal separation, the proposed algorithm requires the response of the reflection path which is estimated from the acoustic response between an external sound source and the sensor. Finally, the control filter is adjusted using the FxLMS (Filtered-x Least Mean Square) algorithm. To verify the effectiveness of the proposed algorithm, it was implemented in real time using a DSP (Digital Signal Processing) board, and the experimental results obtained in one-dimensional air-acoustic environment show that the reflections of the 1 kHz burst can be reduced by 11.6 dB.

Keywords: Active noise control, Signal separation, Sonar system, Active reflection control, Fx-LMS (Filtered-x Least Mean Square)

PACS numbers: 43.60.Mn, 43.30.Vh

1. 서 론

반향음 제어는 빌딩의 무반향실에서 원치 않게 발생하는 반사음을 제어하거나 수중 잠수함을 적군으로부터 보호하기 위한 피탐지 감소 기술 등 다양한 곳에서 활용되고 있는 기술이다.

일반적으로 벽에 무반향 타일을 부착하거나 벽의 두께를 두껍게 하는 수동적인 방법과 입력 센서와 제어 트랜스듀서를 이용한 능동적 방법으로 나눌 수 있다. 능동 반향음 제어 알고리즘은 소음원이 제어 신호와 중첩되어 전체 음압이 상쇄 되는 것을 목표로 하는 ANC(Active Noise Control) 기술을 응용한 것으로 반향음과 같은 크기, 반대 위상의 제어 신호를 발생시켜 반향음을 제어한다. 이 경우 수동적인 방법에 비해 더 넓은 영역의 주파수 대역과 파장이 긴 소음

†Corresponding author: Young cheol Park (young00@yonsei.ac.kr)
Division of Computer and Telecommunication Engineering,
Chang jo room 269, Yonsei University, 1 Yonsei-dae-gil, Wonju,
Gangwon-do 26493, Republic of Korea
(Tel: 82-33-760-2756, Fax: 82-33-763-4323)

원에 대한 제어가 용이하다는 장점이 있다.^[1-5] 반향음을 제어하기 위한 선행 연구로 먼저 아날로그 회로를 이용하는 방법^[6]이 있다. 이는 먼저 반사면에 대한 반사 계수를 측정하고 센서에서 측정되는 신호에 역 위상을 구하여 적용하는 방식이다. 그러나 이 방법은 1 kHz 이하의 신호들에 대한 반향음 제어로 한정되며 근거리 음장 효과가 존재한다.^[6] 그리고 새로운 음향 시스템에 적용할 때마다 새로운 아날로그 회로를 제작하여야 하는 단점이 있다.

또한 디지털 도메인에서 신호처리를 이용해 능동적으로 임피던스를 제어하는 방법^[7]이 제안되었다. 하지만 입사음을 측정하기 위해 설치된 센서들은 제어음향까지 함께 측정하기 때문에 피드백 요소로 제어 성능을 저하시킨다. 이 피드백 성분을 피하기 위해 인접한 두 센서를 이용하여 입사음과 반향음을 구분하는 빔포밍 기술을 사용할 수 있다.^[8,9] 두 센서로부터 측정된 신호에서 시간지연을 보상해 줌으로써 입사 신호와 반향음을 구분하고 효율적으로 반향음을 제어할 수 있다. 알고리즘의 효과적인 성능을 위해 두 센서의 거리가 충분히 확보되어야 한다.

본 논문에서는 두 개의 센서를 이용하는 기존 방식이 아닌 단일 센서 기반의 시스템에서 수집된 신호로부터 반향음을 분리하고 이를 기반으로 FxLMS (Filtered-x Least Mean Square) 알고리즘을 이용해 능동적으로 반향음을 제어하는 알고리즘을 제안한다. 제안된 능동 반향음 제어 시스템은 오직 하나의 센서만이 요구되며 실제 1차원 덕트 환경에서 DSP (Digital Signal Processing) 보드를 이용해 실시간 시스템으로 구현하여 그 효용성을 검증하였다.

제안된 알고리즘은 이후 삼차원 환경에서 확장 적용 가능하며 뿐만 아니라 능동 흡음타일 제작에 사용될 수 있다.

II. 단일 센서 기반 능동 반향음 제어 시스템

2.1 단일 센서 음향 신호의 분리

Fig. 1은 단일 센서 기반의 반향음 제어 시스템의 구성을 나타낸다. 제어 시스템은 입사 음향 신호와

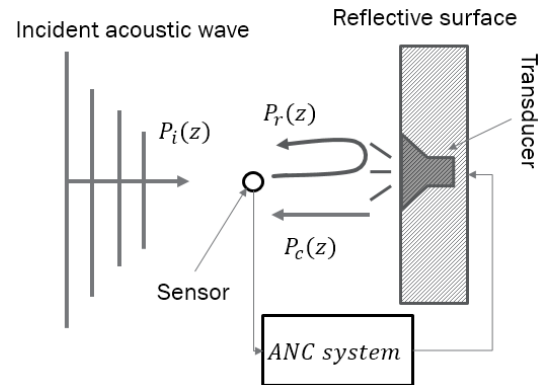


Fig. 1. Configuration of a single sensor-based active reflection control system.

반사음 및 제어 신호를 짐작하기 위한 센서와 반사면에 설치된 제어용 트랜스듀서로 구성된다. 또한 제어 시스템을 위해 아날로그 혹은 디지털 제어 발생 장치가 포함된다.

Fig. 1의 시스템에서 센서 입력 신호를 z -영역에서 나타내면 다음과 같다.

$$S(z) = P_i(z) + P_r(z) + P_c(z), \quad (1)$$

위 식에서 $S(z)$ 는 센서 신호, $P_i(z)$, $P_r(z)$, $P_c(z)$ 는 각각 입사 음향신호, 반향음 그리고 제어신호를 나타낸다. $P_r(z)$ 는 입사 소음에 의해 발생된 반향음이기 때문에 Eq. (1)을 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$S(z) = P_i(z) + P_i(z)T_r(z) + P_c(z), \quad (2)$$

$T_r(z)$ 은 음향 반향경로의 주파수 특성으로 센서에서 반사면을 맞고 다시 센서까지 되돌아오는 경로를 의미한다. 따라서 반향 경로 특성 $T_r(z)$ 를 알고 있다면 단일 센서 신호로부터 입사 음향신호를 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$P_i(z) = \frac{S(z) - P_c(z)}{1 + T_r(z)}, \quad (3)$$

또한 반향음은 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$P_r(z) = \frac{[S(z) - P_c(z)] T_r(z)}{1 + T_r(z)}, \quad (4)$$

Eqs. (3)과(4)의 입사음향 신호와 반사음 추정치를 시간 영역에서 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} p_i(n) &= s(n) - p_c(n) - \mathbf{t}_r^T \mathbf{p}_i(n), \\ p_r(n) &= \mathbf{t}_r^T [\mathbf{s}(n) - \mathbf{p}_c(n)] - \mathbf{t}_r^T \mathbf{p}_r(n). \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_i(n) &= [p_i(n), p_i(n-1), \dots, p_i(n-M_r-1)]^T, \\ \mathbf{p}_r(n) &= [p_r(n), p_r(n-1), \dots, p_r(n-M_r-1)]^T, \\ \mathbf{p}_c(n) &= [p_c(n), p_c(n-1), \dots, p_c(n-M_r-1)]^T, \\ \mathbf{s}(n) &= [s(n), s(n-1), \dots, s(n-M_r-1)]^T, \\ \mathbf{t}_r &= [t_{r,0}, t_{r,1}, \dots, t_{r,M_r}]^T. \end{aligned} \quad (6)$$

위 식에서 T 는 트랜스포즈 연산자이며 $s(n), p_i(n), p_r(n), p_c(n), t_{r,i}$ 는 각각 $S(z), P_i(z), P_r(z), P_c(z), T_r(z)$ 의 시간 도메인 표현이다. 이때 음향 반사 경로 $T_r(z)$ 의 차수는 M_r+1 이다. 한편 센서에 짐음된 제어신호 $p_c(n)$ 는 제어필터 출력 $y(n)$ 과 제어 음향 경로 \mathbf{t}_c 를 이용하여 $p_c(n) = \mathbf{t}_c^T \mathbf{y}(n)$, $\mathbf{y}(n) = [y(n), \dots, y(n-M_c+1)]^T$ 와 같이 구할 수 있다. 여기서 M_c 는 제어경로의 차수이다. Eq. (5)를 통해 반향 경로와 제어 경로가 주어지면 단일 센서 신호 $s(n)$ 으로부터 입사 신호와 반사신호 $p_i(n), p_r(n)$ 을 추정할 수 있다. 그러나 Eq. (5)는 비인과성 문제로 인해 물리적으로 구현이 불가능한 시스템이다.

한편, 반향경로의 임펄스 응답 \mathbf{t}_r 은 센서와 거리 차이가 있기 때문에 센서에서 벽을 왕복하는 동안 시간지연이 생기고 이에 따라 응답이 없는 초기 상태를 가지게 된다. 즉 \mathbf{t}_r 를 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\mathbf{t}_r = (0, 0, \dots, 0, t_{r,K+1}, t_{r,K+2}, \dots, t_{r,M_r})^T, \quad (7)$$

위 식에서 초기 영 응답의 길이 K 는 센서와 반사벽면 간의 거리 d 에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$K = \lfloor (2d/c) \times F_s \rfloor, \quad (8)$$

c 는 음속, F_s 는 샘플링 주파수를 나타내며, $\lfloor \cdot \rfloor$ 는 정수 연산자이다. 따라서 Eq. (7)의 \mathbf{t}_r 를 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\mathbf{t}_r = \left(\underbrace{0, \dots, 0}_K, \tilde{\mathbf{t}}_r^T \right)^T, \quad (9)$$

Eq. (9)와 같이 초기 영 응답이 표현된 반향 경로 $\tilde{\mathbf{t}}_r$ 를 사용할 수 있으며 $K=1$ 로 나타낼 경우 Eq. (6)의 M_r+1 로 표현된 식에서 Eq. (10)과 같이 $p_i(n), p_r(n)$ 을 제외한 M_r 차 식으로 표현 가능하다. 그러므로 Eq. (5)의 비인과성 문제를 해결할 수 있으며 최종적으로 단일 센서로 짐음된 신호를 이용하여 입사음과 반사음을 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} p_i(n) &= s'(n) - \tilde{\mathbf{t}}_r^T \mathbf{p}_i(n-K), \\ p_r(n) &= \tilde{\mathbf{t}}_r^T s'(n-K) - \tilde{\mathbf{t}}_r^T \mathbf{p}_r(n-K), \end{aligned} \quad (10)$$

위식에서 $s'(n) = s(n) - p_c(n)$ 는 제어 신호가 제거된 센서 신호를 의미한다.

2.2 음향 반사 경로의 추정

앞 절에서 단일 센서 기반의 시스템에서 반향 경로 응답 \mathbf{t}_r 와 제어 경로 응답 \mathbf{t}_c 을 알고 있을 때 입사음과 반향음을 분리할 수 있음을 보였다. 제어 경로 응답은 트랜스듀서와 입력 센서 간의 음향 경로이므로 일반적인 음향 응답 측정 방법^[10]을 사용하여 제어신호와 센서 출력 신호로부터 직접적인 측정이 가능하다. 하지만 센서와 반사체 간의 반향경로는 직접적으로 측정할 수 없기 때문에 센서 응답으로부터 반향 경로 응답만을 분리해 내는 방법이 필요하다.

반향경로 응답 $T_r(z)$ 를 얻기 위해 먼저 외부 소음원과 센서 간의 음향 경로를 측정한다. 이는 Fig. 1의 구조에서 센서 좌측면에 외부 입사음에 해당하는 음원을 배치하여 두 위치 간 응답을 측정함으로써 가능하다. 이 경우 외부 입사음원과 센서간의 음향 경로 응답은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_s(z) = T_p(z) + T_p(z)T_r(z), \quad (11)$$

$T_s(z)$ 는 외부 음원 신호와 센서 입력을 사용하여 측정 가능한 음향 응답을 나타내며, $T_p(z)$ 는 음원과 센서 간의 일차경로 응답, $T_r(z)$ 는 센서와 반사체 간의 반향경로의 음향 응답을 나타낸다. $T_p(z)$ 는 Fig. 1의 구조에서 반사체가 없는 상태(혹은 반사체 대신에 흡음체를 배치한 상태)에서 측정이 가능하다. 따라서 $T_s(z)$ 와 $T_p(z)$ 가 사전 측정되었다고 가정하면, $T_r(z)$ 는 Eq. (11)로부터 디컨벌루션 과정을 거쳐 얻을 수 있다.

$$\hat{\mathbf{t}}_r = Z^{-1} \left[\frac{T_s(z) - T_p(z)}{T_p(z)} \right], \quad (12)$$

Z^{-1} 는 z 역변환을 나타내며, Eq. (12)의 디컨벌루션 과정은 FFT를 사용하면 쉽게 구현할 수 있다.^[11] 결과적으로 Eq. (12)를 사용하면 외부 음원과 센서간 음향 응답 측정을 통해 센서와 반사체 간의 음향경로의 응답특성을 추정할 수 있다.

2.3 적응 알고리즘 구현

Fig. 2는 2.1절에서 기술한 신호분리 알고리즘을 사용하는 단일 센서 기반의 능동 반향음 제어 시스템의 블록도이다. 신호 분리는 Eqs. (10)과 (13)을 사용하였는데, Fig. 2의 블록도는 $K=1$ 을 사용하는 경우에 대해 얻어진 블록도이며 그림에서 $\hat{\cdot}$ 기호는 추정된 신호 혹은 응답을 의미한다.

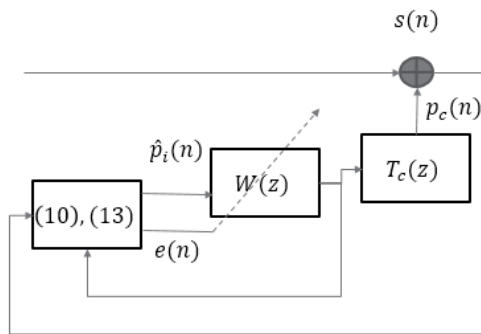


Fig. 2. Block diagram of single sensor based active reflection control system using the FxLMS algorithm.

제어필터의 출력은 분리된 입사신호를 사용하여 $\mathbf{y}(n) = \mathbf{w}(n)^T \hat{\mathbf{p}}_i(n)$ 와 같이 얻어지며, 반사음 제어를 위한 오차신호 $e(n)$ 은 다음과 같이 정의 된다.

$$\begin{aligned} e(n) &= \hat{p}_r(n) + \hat{p}_c(n), \\ &= \hat{p}_r(n) + \hat{\mathbf{t}}_c^T \mathbf{y}(n). \end{aligned} \quad (13)$$

$\mathbf{y}(n) = [y(n), y(n-1), \dots, y(n-M_c+1)]^T$ 은 제어필터의 출력 신호벡터다. Eq. (13)의 오차 신호로부터 자승평균오차를 최소화하는 FxLMS의 계수 갱신 식은 다음과 같다.^[1]

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) - \frac{\mu}{\|\sigma_i^2(n)\| + \delta} \mathbf{p}'_i(n)e(n), \quad (14)$$

μ 는 스텝사이즈이며 δ 는 알고리즘을 안정화시키기 위한 작은 상수이다. $\mathbf{p}'_i(n) = [p'_i(n), p'_i(n-1), \dots, p'_i(n-M_c+1)]^T$ 은 측정된 제어경로 응답으로 보상된 참고입력 신호벡터로 각 성분은 $p'_i(n) = \hat{\mathbf{t}}_c^T \hat{\mathbf{p}}_i(n)$ 으로 얻어진다. $\sigma_i^2(n)$ 은 LMS 정규화 상수로 참고 입력 신호로부터 계산된 제곱 평균이다.

III. 실험 및 결과

본 논문에서 제안된 알고리즘은 일차원 환경에서 반향음 제어 시스템에 응용이 목적이다. 그 효용성을 검증하기 위하여 1차원 음향 덕트 환경에서 실시간 연산 장치를 통하여 제안한 알고리즘을 구현하였다. 실험 환경은 Fig. 3과 같다. 덕트의 크기는 1×0.14

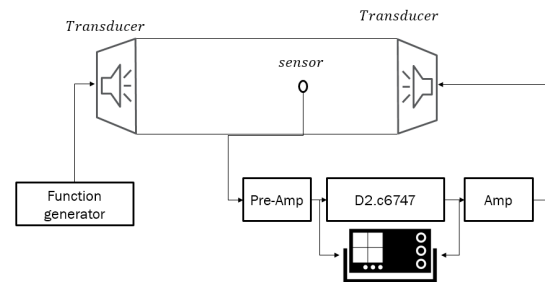


Fig. 3. Configuration of single sensor based active reflection control system.

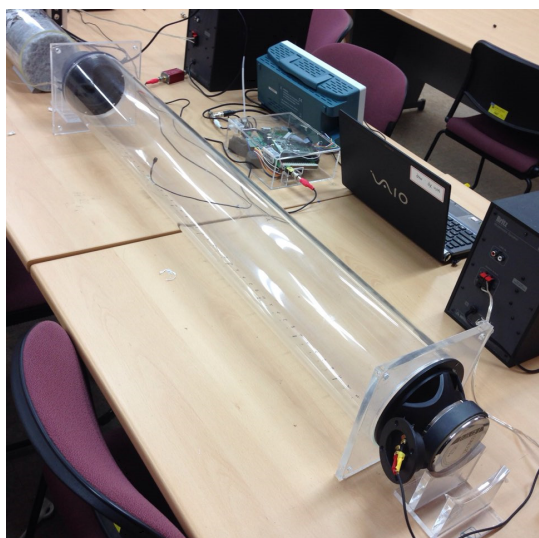


Fig. 4. Configuration of the single sensor-based active reflection control system.

$\times 0.14 m^3$ 로 5 mm 두께의 아크릴로 제작하였으며 반사면에서 센서까지의 거리는 30 cm이다. 실시간 구현과 신호 관찰의 용이성을 위해 마이크와 스피커의 간격 그리고 입사 음향 신호를 결정하였다. 입사 신호를 발생하는 음원과 제어용 트랜스듀서로는 브리츠사의 BR-3100S 스피커를 사용하였으며, 음향 신호 수집을 위한 센서로 소형 핀 마이크를 사용하였다. 마이크 입력 신호는 프리앰프를 거쳐 DSP 보드(D.module.2.C6747)로 인가되며, DSP 보드에 의해 생성되는 제어 신호는 스피커 앰프를 거쳐 제어용 스피커를 통해 출력된다. Fig. 4는 실제 구성된 실험 시스템을 보여주고 있다. DSP 보드의 샘플링 주파수는 24 kHz를 사용하였으며, FxLMS 계수 갱신을 위한 스텝사이즈는 0.4, 제어 필터 차수는 32차로 설정하였다.

입사 음향 신호는 보다 구분된 입사음과 반향음을 측정하기 위하여 펄스가 아닌 한 주기 길이를 갖는 1 kHz 버스트를 사용하였다. 사용된 버스트 신호는 길이가 짧기 때문에 스피커의 음향 특성에 의해 쉽게 왜곡될 수 있다.^[12] 이를 피하기 위해 버스트 신호를 사전에 측정된 스피커의 음향 특성으로 보정한 후에 입사 음원으로 사용하였다. 먼저, 측정된 스피커와 마이크 간 주파수 영역 전달함수 $H_s(f)$ 를 사용하여 보상 필터의 전달함수를 $C_p(f) = H_p^*(f) / [H_p(f)H_p^*(f) + \delta_p]$

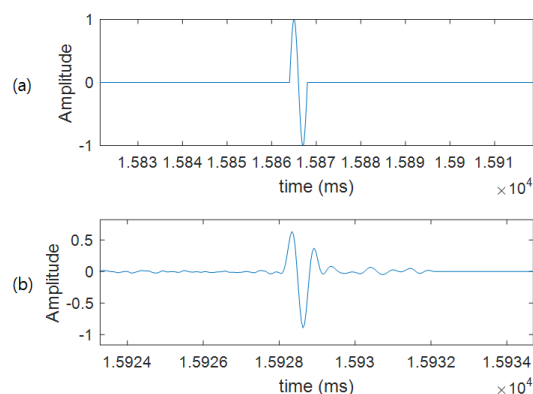


Fig. 5. The input acoustic signals: (a) before compensation, (b) after compensation using the speaker response.

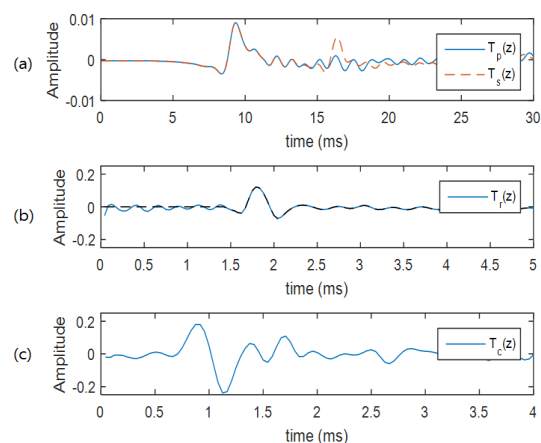


Fig. 6. Measured responses of the acoustic paths: (a) primary path & sensor impulse response (b) reflection path, (c) control path.

와 같이 구한다.^[12] 이후에 $C_p(f)$ 를 시간영역 응답으로 변환하고, 구해진 응답을 사용하여 입사 버스트를 필터링함으로써 스피커에 의한 왜곡을 사전에 보상하였다. Fig. 5는 원 버스트 입사신호와 $C_p(f)$ 를 사용하여 스피커 특성을 보정한 버스트 입사신호의 모양을 보여준다.

Fig. 6은 덕트에서 측정된 음향경로들을 나타낸다. 먼저 Fig. 6(a)의 실선은 음향 덕트 끝단에 흡음재를 설치한 후 외부 입사음원(음원 스피커)과 센서 간의 일차경로 $T_p(z)$ 를 측정된 결과이다. 음향 덕트 끝단에 제어 스피커를 설치한 후 측정된 음원 스피커와 센서간의 응답 $T_s(z)$ 는 Fig. 6(a)의 점선과 같이 나타난다.

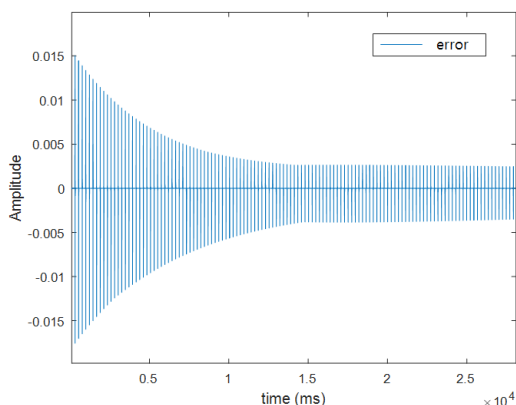


Fig. 7. Convergence process of estimated error.

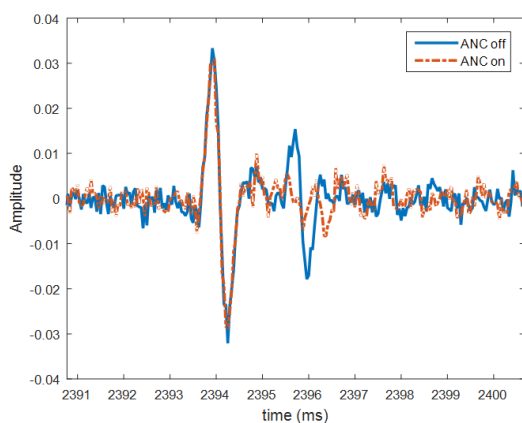


Fig. 8. Control result of the reflected 1 kHz burst.

측정된 $T_p(z)$ 와 $T_s(z)$ 로부터 Eq. (12)를 이용하여 $T_r(z)$ 를 추정하였다. 추정된 반사 경로는 Fig. 6(b)의 실선과 같이 나타난다. 그러나 센서와 반사체 간의 간격에 해당하는 초기 샘플 기간은 물리적으로 응답이 발생하지 않기 때문에 이에 해당하는 초기 구간을 강제적으로 영을 만들어 주면 Fig. 6(b)의 점선과 같이 나타난다. 실험에서는 Fig. 6(b)의 점선에 해당하는 응답을 사용하였다. 한편 측정된 제어 경로의 시간 영역 응답 \hat{t}_c 는 Fig. 6(c)에서 볼 수 있다. DSP 보드를 이용한 실시간 구현을 위해 측정된 경로 응답 \hat{t}_r 와 \hat{t}_c 는 각각 $M_r = 64$, $M_c = 48$ 로 제한하여 사용하였다.

Fig. 7은 DSP 보드에 의해 계산된 오차 신호 $e(n)$ 의 시간에 따른 변화를 보여주고 있다. 제안된 알고리즘이 성공적으로 반사음을 제어하고 있음을 알 수 있다. Fig. 8은 제어 알고리즘이 충분히 수렴한 후인

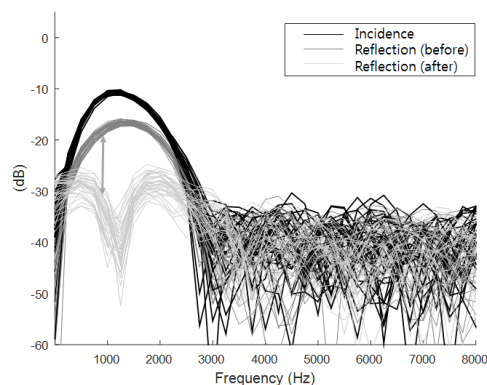


Fig. 9. Frequency response of the reflected burst before and after the control.

27초에 관찰한 센서 신호를 보여주고 있다. 반사음 제어 결과 제어 전 반사음(실선)의 크기에 비해 제어 후(점선) 상당한 수준으로 감소하는 것을 보여주고 있다.

제어 결과의 정량적 측정을 제어 전과 후의 반사음 특성을 주파수 영역에서 관찰하였다. 각각의 주파수 응답은 Fig. 9와 같다. 보다 정확한 관찰을 위해 다음과 같이 정의되는 제어 전 후의 ER(Echo Ratio)를 측정하였다.

$$ER = 20 \log_{10} \left(\frac{Incidence}{Reflection} \right). \quad (15)$$

입사신호의 중심주파수인 1 kHz에서 측정된 결과 수렴 상태에서 평균 11.6 dB의 ER 결과를 얻을 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 단일 센서 기반의 능동 반향음 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘에서는 단일 센서 신호로부터 입사음과 반향음을 분리하고, 분리된 입사신호를 참조 신호로 사용하는 FxLMS 알고리즘을 구동하여 제어신호를 생성한다. 알고리즘의 효용성 검증을 위해 DSP 보드를 이용한 실시간 실험을 실시하였으며, 실험 결과 1차원 공기 중 덕트 환경에서 한주기의 1 kHz 버스트 신호에 대해 반사음을 11.6 dB까지 줄일 수 있음을 확인하였다. 실시

간 구현을 위해 아날로그에서 디지털, 디지털에서 아날로그 변환에 의한 입출력 지연시간이 짧고 충분한 연산량을 보장 하는 고성능 DSP 장비가 사용 되어야 한다. 제안된 알고리즘은 추후 무반향실이나 소나시스템에 대응 가능한 피탐지 감소기술로 확장 이 가능하다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 피탐지 감소기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

1. S. M. Kuo and D. R. Morgan, "Active noise control: a tutorial review," Proc. of the IEEE, **87**, 943-973 (1999).
2. B. Widrow, J. R. Glover, J. M. McCool, J. Kaunitz, C. S. Williams, R. H. Hearn, J. R. Zeidler, J. E. Dong, and R. C. Goodlin, "Adaptive noise cancelling: Principles and applications," Proc. of the IEEE, **63**, 1692-1716 (1975)
3. J. C. Burgess, "Active adaptive sound control in a duct: A computer simulation," J. Acoust. Soc. Am. **70**, 715-726 (1981).
4. P. R. Enderle and G. R. Batta, "Stability of active noise control systems in ducts," in Proc. Noise-Con, **1**, 167-172 (1990).
5. D. Guicking and K. Karcher, "Active impedance control for one-dimensional sound," J. Vib. Acoust. **106**, 393-936 (1984).
6. M. Furstoss, D. Thenail, and M. Galland, "Surface impedance control for sound absorption: Direct and Hybrid Passive / Active Strategies," J. Sound. Vib. **203**, 219-236 (1997).
7. H. Zhu, R. Rajamani, and K. A. Stelson, "Active control of acoustic reflection, absorption, and transmission using thin panel speakers," J. Acoust. Soc. Am. **113**, 852-870 (2003).
8. T. R. Howarth, V. K. Varadan, X. Bao, and V. V. Varadan, "Piezocomposite coating for active underwater sound reduction," J. Acoust. Soc. Am. **91**, 823-831 (1992).
9. C. Jung. "Active noise control techniques" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **11**, 70-75 (1992).
10. A. Farina, "Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique," AES 108th

Convention, paper no.1-23 (2000).

11. J. Kim, Y. Ji, and Y. Park, "Improved separation method of reflective path that applicable in single sensor based system," 2016 LOTC, 81-82 (2016).
12. Marshall, "The production of acoustic impulse in the air," Meas. sci. Technol. **1**, 413-418 (1990).

저자 약력

▶ 김 재 필 (Jaepil Kim)



2015년: 연세대 정보통신공학과(학사)
2015년~현재: 연세대 전산학과 석사과정

▶ 지 유 나 (Youna Ji)



2011년: 연세대 컴퓨터정보통신 공학부 (학사)
2011년~현재: 연세대 전산학과 석박사 통합과정

▶ 박 영 철 (Young cheol Park)



1986년: 연세대 전기전자공학과(학사)
1988년: 연세대 전기전자공학과(석사)
1993년: 연세대 전기전자공학과(박사)
2002년~현재: 연세대학교 컴퓨터정보통신 공학부 교수

▶ 서 영 수 (Young soo Seo)



1999년 2월: 부산대 기계공학과 학사
2001년 2월: 부산대 기계설계공학과 석사
2005년 8월: 부산대 기계설계공학과 박사
2006년 1월~현재: 국방과학연구소 선임 연구원