

수중 표적 신호 방해를 위한 저주파 능동 반향음 감소 기술 연구

A Study on the Low-frequency Active Echo Reduction Technology for Reducing Underwater Target Echo Signal

김재필* · 지유나* · 박영철† · 노응휘** · 엄원석** ·
최용규*** · 김대업*** · 서영수****

Jaepil Kim, Youna Ji, Young-cheol Park, Eunghwy Noh, Won-Suk Ohm,
Yonggyu Choi, Daeup Kim and Youngsoo Seo

(Received October 13, 2016 ; Revised December 29, 2016 ; Accepted December 29, 2016)

Key Words : Acoustic Tile(음향 타일), Active Echo Reduction(능동 반향음 감소), Low Frequency(저주파수)

ABSTRACT

Acoustic tiles are typically installed on the surface of pressure vessels in submarines to minimize echoes based on the ship's own noise and active sonar. In this study, we studied low frequency active echo reduction techniques to reduce underwater target echo signals. Active control algorithms using tile type projectors and FxLMS logic have been developed and the projectors have been installed in the assumed hull structure. The effectiveness of projectors and control algorithms has been evaluated in time and frequency domain analysis through experiments in the tank.

1. 서 론

수중에서 은밀한 작전 수행을 전담하는 잠수함은 현대전에서 비대칭전의 핵심 전력으로 간주되고 있으며, 이러한 수중 전투 세력을 탐지하기 위한 방법 중 가장 일반적인 것은 음향 신호를 이용하는 것이기 때문에, 잠수함의 음향 스텔스 성능은 생존성과 직결되는 중요한 성능 중 하나이다. 수중 음향 신호를 이용한 잠수함의 탐지 방법은 잠수함 자체에서 발생하는 음향 신호를 감지하는 수동 소나 방식 그리고 음파를 송신하여 해당 음파를 수신한 잠수함에 서 반향되는 음파를 탐지하는 능동 소나 방식이 있

다. 이에 통상적인 잠수함에는 이러한 능동 및 수동 소나 방식에 의한 탐지 가능성을 낮추기 위하여 자 함 음향신호 및 반향음 수준 저감을 위한 음향 타일을 선체 외판에 사용하고 있다.

한편, 최근 고주파수 능동 소나의 탐지 가능 거리의 한계를 극복하기 위하여 음파 전송 거리와 파장이 상대적으로 긴 저주파수 능동 소나 기술이 활발하게 개발되고 있는데, 이로 인한 탐지 가능성을 낮추기 위해서는 파장 길이를 고려하여 최소 수십 cm 이상의 두께를 갖는 음향 타일을 선체 외판에 부착해야 하는 문제가 있다.

현재 적용되고 있는 음향 타일은 임피던스 차에 의해 발생하는 반향음을 최소화하기 위하여 해수와

† Corresponding Author; Member, Division of Computer & Telecommunications Engineering., Yonsei University
E-mail : young00@yonsei.ac.kr

* Member, Multimedia Signal Processing Lab., Yonsei University

** Member, Yonsei University

*** Createch Co., Ltd.

**** Member, Agency for Defense Development

‡ Recommended by Editor Jae Hung Han

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

유사한 음향 임피던스를 갖는 재료로 구성하되, 내부 형태를 다양한 크기를 갖는 기공 또는 첨가제가 포함되도록 하여 음향 신호를 소산 또는 산란시켜서 반향음을 감소시키는 작용을 한다. 이때, 음향 타일의 반향음 감소 성능은 음향 타일 내부 재료 특성, 기동 또는 첨가제의 기하학적 형상과 함께 음향 타일의 두께에 따라 달라지게 된다. 즉, 주로 수십 kHz 성분을 갖는 중고주파수 대역의 음향 신호를 방사했던 기존의 능동 소나에 의한 반향음을 효과적으로 저감하기 위해서는 수 cm 이내의 두께를 갖는 음향 타일을 사용하는 것으로도 적절한 수준의 반향음 저감 성능을 확보할 수 있었다. 하지만, 저주파수 능동 소나의 경우, 파장 길이가 수 m에 이르는 음파를 발생시키기 때문에 이를 저감하기 위해서는 음향 타일의 두께가 중고주파수 능동 소나 대비 매우 크게 증가해야 한다. 음향 타일의 두께 증가는 선체 자체 중량을 증가시킬 뿐만 아니라, 이로 인한 추력 상승이 요구되므로 고중량 및 고출력 추진체계 탑재로 이어지게 된다. 이에 최근에는 음향 타일의 두께를 증가시키지 않으면서도 저주파수 대역에서의 반향음 저감 성능을 확보할 수 있는 다양한 연구들이 활발하게 시도되고 있다.

저주파 능동 소나에 대항하는 음향 스텔스 기술로서 추가적인 제어음을 발생시켜 능동적으로 반향음을 감소시키는 기술에 대한 연구들이 수행되었다⁽¹⁻⁵⁾. 대표적으로 Howarth⁽¹⁾는 톤필즈 트랜스듀서와 압전복합체 트랜스듀서를 이용해 반사면에서 능동 임피던스 정합을 통해 반사파를 감소시키는 실험을 수행하였다. 그리고 Lafleur⁽²⁾는 탄성 중합체에 압전물질을 혼합한 piezorubber를 사용하였고, Chang⁽³⁾은 두 층의 압전복합체를 각각 압력 센서와 액추에이터로 사용하였다. 그러나 위 연구들은 상대적으로 작은 반사면을 갖는 액추에이터를 사용하여 도파관 내 1차원 평면파 반향음의 제어만을 시도하여, 3차원적 반향음 제어 혹은 선체 표면과 같은 대면적에의 적용이 어렵다는 한계를 가지고 있다. Braga⁽⁴⁾는 2차원 표면에서의 능동 반향음 감소 기술에 대해서는 적층 압전판에서의 반사파 감소에 대해 이론적으로 연구하였고, Scandrett⁽⁵⁾는 FEM과 FDM을 통해 점탄성 및 압전 물질을 이용한 수중 산란 신호의 감소에 관하여 연구하였으나 실제 실험까지 수행되지는 않았다.

이 논문에서는 수중함 선체 외부 광범위한 범위에의 음향타일 적용을 고려한 저주파 능동 반향음 감소용 타일형 프로젝터 및 제어 알고리즘을 개발하고 제작하였다. 개발된 타일형 프로젝터 및 제어 알고리즘의 성능은 저주파수 대역 실험이 가능하도록 대형 구조물을 설계 및 제작하여 저주파수 능동 반향음 감소 실험을 실시하여 검증하였다. 실험 주파수는 대형 구조물과 수조 크기를 고려하여 f_1 Hz에서 f_3 Hz까지 수행하였으며, 반향음 제어 성능은 제어 전과 후의 반향음의 크기를 비교하여 확인하였다.

2. 제어기법

2.1 능동 임피던스 정합

능동 임피던스 정합은 이 연구에서 저주파 반향음 제어를 구현하기 위한 핵심 요소로서, 물체 표면의 음향 임피던스를 능동적으로 매질의 그것과 일치시켜 반사가 일어나지 않도록 하는 기법이다. Fig. 1(a)은 밀도 ρ_0 , 음속 c_0 을 갖는 매질 내에서 음압 P^+ 를 갖는 입사파가 물체 표면에 입사하는 상황을 도시하고 있다. 매질의 고유 음향 임피던스 Z_0 와 물체 표면의 음향 임피던스 Z_n 의 차이에 의해 반사계수 R_n 을 갖는 경우, 반향음의 음압 P^- 과 입사 속도 U^- 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P^- &= R_n \cdot P^+, \\ U^- &= -R_n \cdot U^+. \end{aligned} \quad (1)$$

Fig. 1(b)는 표면의 액추에이터가 동작하여 제어음 P^A 가 추가되는 경우를 나타내고 있다. 액추에이터와 표면의 음향 특성이 모두 고려된 유효 반사계수를 R_e 라고 할 때, 반향음의 음압 P^- 과 입사속도 U^- 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P^- &= R_e \cdot P^+, \\ U^- &= -R_e \cdot U^+. \end{aligned} \quad (2)$$

제어음 P^A 를 함께 고려한 액추에이터 표면에서의 전체 음압 P_{total} 과 전체 입사속도 U_{total} , 그리고 이에 따른 전체 음향 임피던스 Z_n 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 P_{total} &= P^+ + P^- + P^A \\
 &= P^+ + R_e \cdot P^+ + P^A \\
 &= (1 + R_e) \cdot P^+ + P^A.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 U_{total} &= U^+ - U^- - U^A \\
 &= \frac{P^+}{\rho_0 c_0} - \frac{R_e \cdot P^+}{\rho_0 c_0} - \frac{P^A}{\rho_0 c_0} \\
 &= \frac{1}{\rho_0 c_0} ((1 - R_e) \cdot P^+ - P^A).
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 Z_n &= \frac{P_{total}}{U_{total}} \\
 &= \rho_0 c_0 \frac{(1 + R_e) \cdot P^+ + P^A}{(1 - R_e) \cdot P^+ - P^A}.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

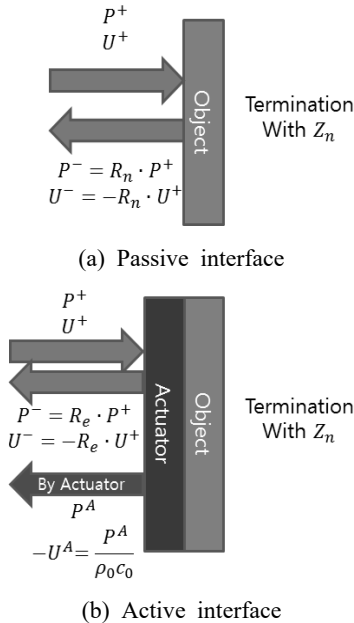


Fig. 1 Incident and reflected waves

대표적인 몇 가지 제어음 P^A 값에 따른 표면에서의 전체 음압 P_{total} 와 전체 음향 임피던스 Z_n 을 Table 1에 나타내었다. Table 1에서와 같이 제어음 P^A 의 값에 따라 표면에서의 음향 임피던스가 0에서 무한대까지 변화함을 볼 수 있다. 특히 $P^A = -R_e \cdot P^+$ 인 경우, 전체 음압 P_{total} 이 입사파 P^+ 와 동일하고, 경계면에서의 음향 임피던스 Z_n 은 매질의 음향 임피던스 $\rho_0 c_0$ 와 동일한 값을 가지게 된다. 즉, 능동 임피던스 정합 시 반향음이 0이 되는 효과를 얻게 된다.

2.2 타일형 프로젝터

이 논문에서는 대면적 적용에 적합한 능동 반향음 감소용 액추에이터로 타일형 프로젝터를 고려하였다. 이와 유사한 형상 및 구조를 갖는 능동 타일이 제안된 바 있으나⁽⁶⁾, 제작되어 성능 시험까지 수행된 예는 보고된 바 없다. 타일형 프로젝터는 rho-c 고무처럼 해수와 유사한 음향 임피던스를 가진 물질을 기질(matrix)로 하여 그 내부에 다수의 단위 액추에이터를 배열함으로써 마치 하나의 대형 프로젝터처럼 작동하는 구조를 갖는다. 이러한 타일형 구조는 기존의 수동 음향 타일의 두께를 유지하면서도 저주파를 포함한 광대역의 반향음을 제어할 수 있다는 장점을 갖는다. 또한, 다수의 타일형 프로젝터를 선체 표면에 2차원적으로 부착함으로써 대면적 반향음 감소 효과를 거둘 수 있는데, 그 효과는 이 연구를 통하여 검증하였다.

2.3 제어 알고리즘

Fig. 3은 선체모사 구조물을 이용한 단일 센서 기반 능동 반향음 제어 시스템의 구성도이며, Fig. 4는 제어 알고리즘의 블록도이다. 제어 시스템은 입사음과 반향음 및 제어음을 집음하기 위한 하이드로폰과

Table 1 Total acoustic pressure and termination impedance as functions of control sound P^A

| P^A | P_{total} | Z_n |
|------------------------|-------------|-------------------------------------|
| $-R_e \cdot P^+$ | P^+ | $\rho_0 c_0$ (impedance matched) |
| $(1 - R_e) \cdot P^+$ | $2P^+$ | ∞ (rigid) |
| $-(1 + R_e) \cdot P^+$ | 0 | 0 (pressure release) |



Fig. 2 Tile type projector

제어 신호 출력을 위한 액추에이터로 구성된다. 하이드로폰에 입사한 P_{total} 은 반향음 제어 시스템 $W(z)$ 를 거쳐 액추에이터를 통해 제어음을 생성한다. 제어 알고리즘에서는 먼저 하이드로폰에 집음된 음압 P_{total} 은 블록A를 통해 입사음, 반사음 그리고 제어음을 분리하게 된다⁽⁷⁾. 음압 분리를 위해서 finite impulse response(FIR)필터로 모델링된 반향경로로 응답을 사용 할 수 있다. 반향경로 응답 t_r 을 이용하여 식 (3)에서 집음 된 신호로부터 입사음과 반사음을 시간영역에서 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} p^+(n) &= p_{total}(n) - p^A(n) - \mathbf{t}_r^T \mathbf{p}^+(n), \\ p^-(n) &= \mathbf{t}_r^T (\mathbf{p}_{total}(n) - \mathbf{p}^A(n)) - \mathbf{t}_r^T \mathbf{p}^-(n). \end{aligned} \quad (6)$$

n 은 시간에 따른 색인이며 $\mathbf{p}^+, \mathbf{p}^-, \mathbf{p}^A, \mathbf{p}_{total}$ 은 각각 입사음, 반향음 제어음 그리고 센서에 집음된 음의 벡터 표현으로, 각 벡터의 길이는 음향 경로 t_r 의 차수 M 과 동일하다. T 는 전치를 의미한다. 시간 인과적 요소를 고려한 방법을 이용하여 먼저 제어음이 제거된 음압과 시간 지연된 음압을 이용하여 순

수한 입사음을 분리한다⁽⁷⁾. 분리된 입사 음압을 이용하여 제어 필터의 출력을 생성하며 반향음과 제어음의 정합 오차가 최소화 되는 방향으로 필터가 동작한다. 이때의 오차신호는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} e(n) &= p^-(n) + p^A(n) \\ &= p^-(n) + \mathbf{t}_A^T \mathbf{y}(n). \end{aligned} \quad (7)$$

t_A 는 생성된 제어 신호가 D/A, 앰프, 그리고 액추에이터를 거쳐 센서까지 도달하는 음향 경로를 의미한다. 필터의 출력은 $y(n) = \mathbf{w}(n)^T \mathbf{p}^+(n)$ 와 같이 얻을 수 있으며 $\mathbf{w}(n)$ 은 제어 필터의 계수벡터로서 벡터의 길이는 필터 차수 N 과 같다. 식 (7)의 오차신호로부터 자승평균을 최소화 하는 FxLMS 계수 갱신식은 다음과 같다⁽⁸⁾.

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) - \frac{\mu}{\|\mathbf{p}^+(n)\| + \delta} \mathbf{p}^+(n)e(n). \quad (8)$$

μ 는 스텝사이즈, δ 는 알고리즘을 안정화하기 위한 작은 상수를 의미한다. $\mathbf{p}^+(n)$ 은 액추에이터와 센서의 특성을 보상한 참조신호의 벡터 표현으로 제어 필터의 차수 N 과 같은 길이를 갖는다. $\mathbf{p}^+(n)$ 을 구성하는 성분들은 식 (9)에서 나타낸 바와 같이 구해진다.

$$p^+(n-i) = \mathbf{t}_A^T \mathbf{p}^+(n-i), i = 0, 1, \dots, N-1. \quad (9)$$

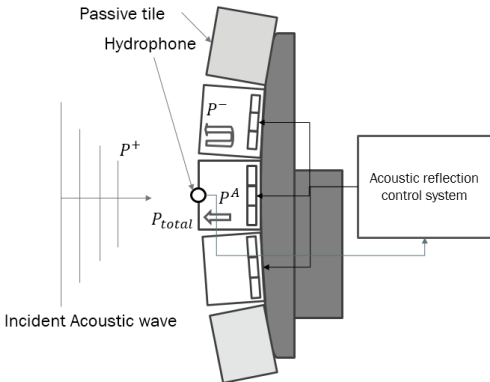


Fig. 3 System configuration for single sensor based active echo control system on assumed hull structure

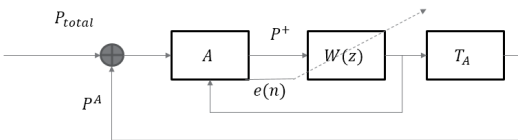


Fig. 4 Block diagram for single sensor based active echo control algorithm

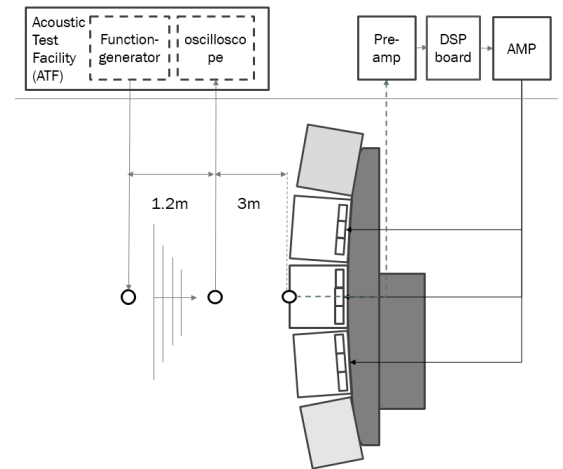


Fig. 5 Test setup

3. 실험

3.1 실험 준비

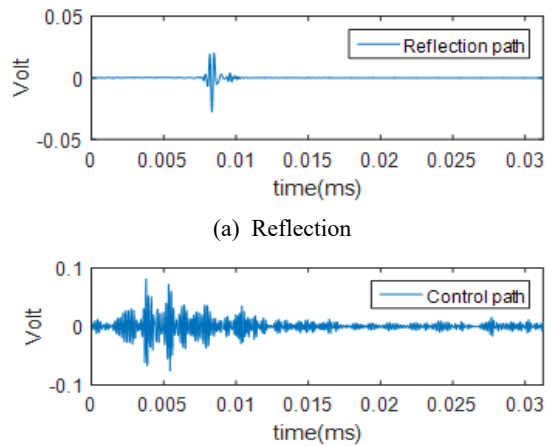
Fig. 5에는 반향음 감소 성능 시험 설비를 나타내었는데, 성능 시험을 위하여 먼저 대형 구조물 표면에 제어신호 인가용 프로젝터를 설치한다. 프로젝터에서 발생하는 음압은 평면파로 가정 한다. 그리고 구조물에서 약 4.2 m 이격된 거리에 음파 능동 송신을 위한 프로젝터, 약 3.0 m 거리에는 입사파와 반사파를 측정하기 위한 하이드로폰을 설치하였다. 실시간 실험에서 센서 신호로부터 음압을 분리하기 위해서는 192 kHz 이상의 높은 샘플링 주파수를 사용해야 한다. 또한 실제 시스템의 음향 경로를 정확히 측정하기 위해서는 수백 탭의 필터 차수가 필요한데 결과적으로 높은 샘플링 주파수와 긴 필터 차수로 인해 연산 복잡도가 높아져 알고리즘을 실시간으로 수행하기 위해서는 고성능의 DSP 장비가 요구된다. 이 실험에서 사용한 DSP 보드는 Dsing.T사의 Dmodule2.C6747로 신호 입출력을 위해 Dmodule2.500k를 daughter board로 함께 이용하였다. 하지만 현재 장비로는 높은 샘플링 주파수에서의 실시간 연산을 감당하기 어려워 실제 실험에서는 사전에 측정된 음향경로들을 이용하여 제어 알고리즘을 실행한 후 생성된 제어 신호를 하이드로폰 입력 신호에 맞추어 출력 하도록 하였다. 실험에 사용된 샘플링 주파수는 96 kHz이며 제어 알고리즘의 필터 차수 N 과 M 은 모두 1024로 설정하였다.

그러나 실제 시스템에서 구한 음향 응답특성 t_s, t_d 의 길이가 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 수백 탭에 달할 정도로 길어서 전체 알고리즘을 실시간으로 구현하는 것이 불가능하였다. 따라서 실시간 실험에서는 사전에 측정된 음향특성을 사용하여 최적의 제어 신호를 미리 계산한 다음, 이를 하이드로폰 입력 신호에 맞추어 출력하도록 하였다.

3.2 실험 결과

이 실험에서의 시험 대상 주파수는 10 kHz 이하의 f_1, f_2 및 f_3 로 하고 5과장의 송신음을 대상으로 시험을 실시하였다. Fig. 7(a)에는 하이드로폰에서 수신된 f_1 주파수를 갖는 입사파와 반사파의 시간 이력 신호를 나타내었는데, 입사파는 약 0.25 V의

크기를 가지고 있으며 제어 전 반사파의 크기는 약 0.08 V로 관찰되었다. 한편, 제어를 수행하면 반사파의 크기가 약 0.01 V 수준으로 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 상기 제어 전후 시간 이력 신호를 푸리에 변환한 결과는 Fig. 7(b)에 나타내었는데, 제어 전후의 반사파 크기의 차는 약 13.4 dB로서 능동 제어로 인해 반향음이 크게 줄어들었음을 확인할 수 있다. 따라서, 타일형 프로젝터 및 FxLMS 알고리즘을 적용한 제어기법이 정상적으로 작동하는 것을 알 수 있다. Fig. 8과 Fig. 9에는 각각 f_2 및 f_3 주파수를 갖는 음파에 대한 능동 반향음 제어 시험 결과를 나타내었는데, 저감되는 반사파의 크기는 시험 대상 주파수에 따라 상이하지만, f_1 주파수와 동일하게 반사파가 저감되는 제어 결과를 나타내고 있다. 그러므로 타일에서 생성한 제어 음압으로 반사파의 크기가 제어되는 것을 확인할 수 있다. 한편, 대면적 반향음 제어 성능을 확인하기 위하여 Fig. 10에 나타낸 마와 같이 하이드로폰의 위치를 0.2 m 간격으로 1 m까지 측면으로 이동시키면서, 제어 전후의 반사파의 크기를 측정하였다. 이로부터 측면 위치 0.6 m까지는 제어가 되고 있으나, 0.8 m 이상의 수평 이격 거리부터는 제어 후 반사파의 크기가 제어전에 비해 커졌음을 알 수 있다. 이는 타일형 프로젝터의 빔폭이 줄어들어서 발생하는 영향으로 사료되며, 타일형 프로젝터의 부착면적을 증가시키거나 제어 알고리즘에서 타일형 프로젝터 구동 전압의 위상차를 이용하여 빔을 조향하면 문제점을 해결될 것으로 판단된다.



(a) Reflection
(b) Control paths
Fig. 6 Estimated

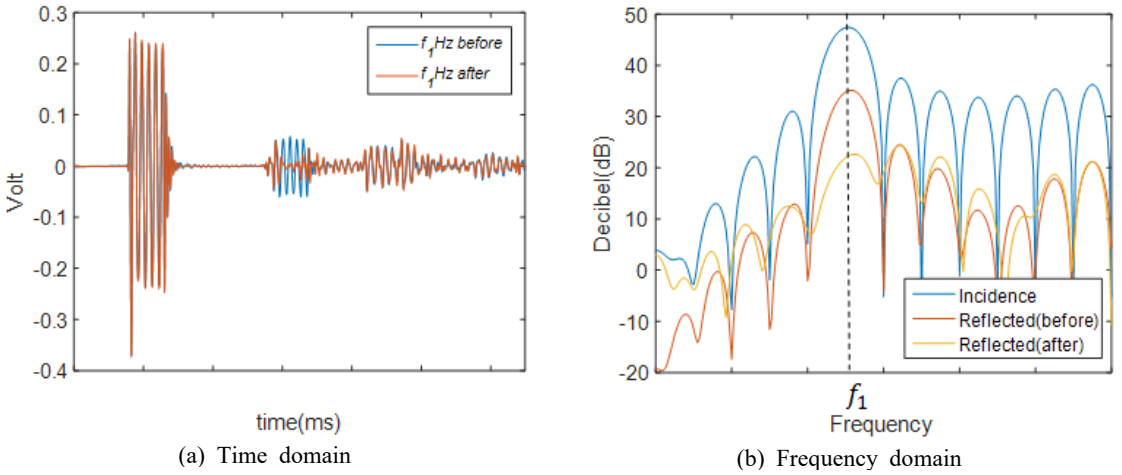


Fig. 7 Test result at f_1 Hz

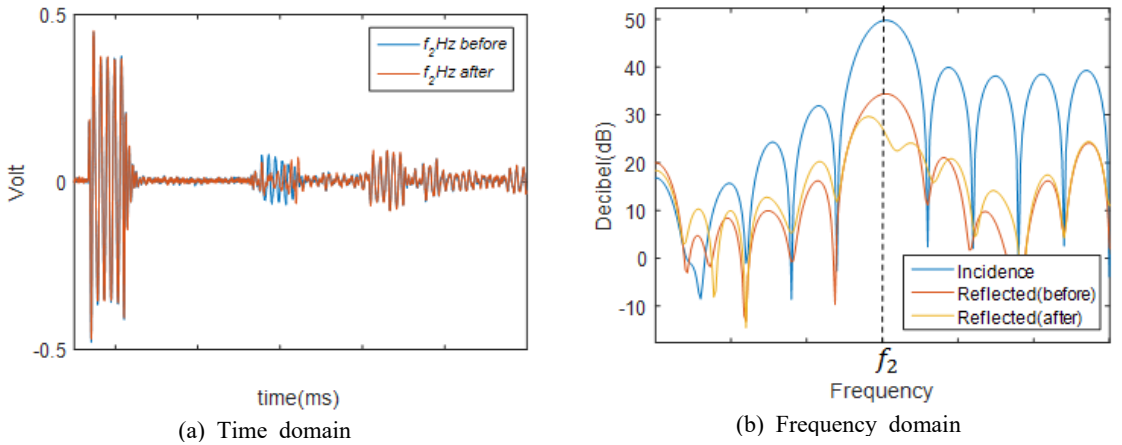


Fig. 8 Test result at f_2 Hz

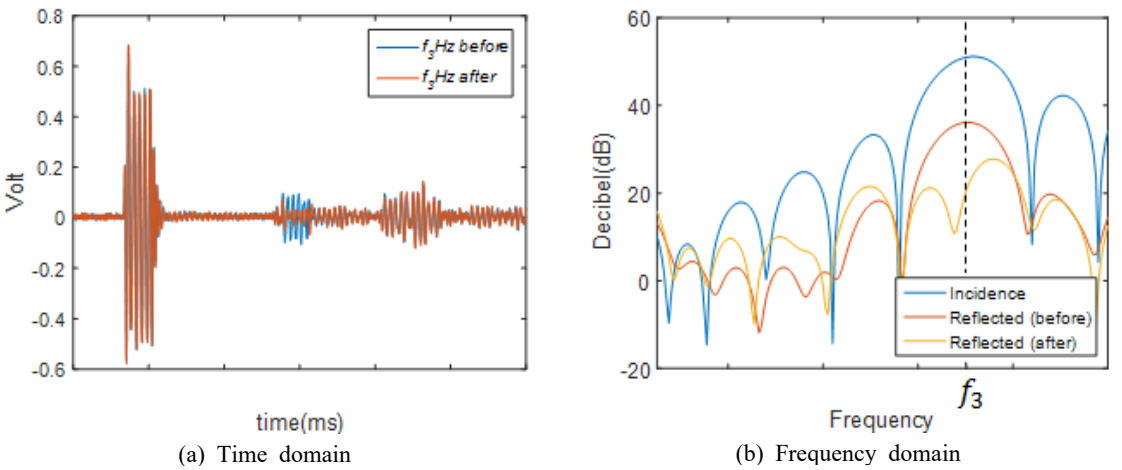


Fig. 9 Test result at f_3 Hz

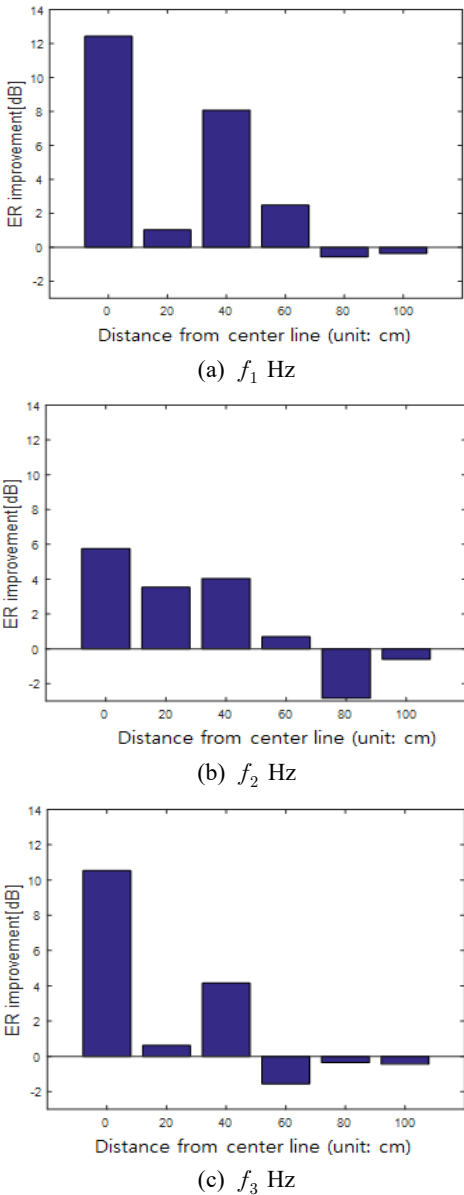


Fig. 10 Test result according to the variation of horizontal distances

3. 결 론

이 논문에서는 수중 표적 신호 감소를 위한 저주파 능동 반향음 감소 기술을 구현하기 위하여 임피던스 정합 이론을 기본으로 하여 FxLMS 알고리즘을 구현하고 타일형 프로젝터를 설계 및 제작하였다. 또한, 수중 표적 신호인 반사파를 제어하기 위

하여 대형 구조물을 제작하고 타일형 프로젝터를 설치 후 제어실험을 수행하였다. 실험 대상 주파수는 f_1 , f_2 및 f_3 3가지 주파수를 이용하였으며, 5주기의 정현파를 이용하였다. 실험결과, 시험 대상 모든 주파수에서 정상적인 제어가 수행됨을 확인하였으며, 축상이 아닌 수평방향에 대해서도 제어가 되는 것을 확인하였다. 다만, 빔폭의 크기를 벗어나는 구간에서는 정상 제어가 되질 않았는데, 이는 타일형 프로젝터의 특성으로 기인한 것으로 사료되며, 추후 타일형 프로젝터의 부착영역을 보다 넓히거나 빔 조향을 통하면 충분히 해결될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

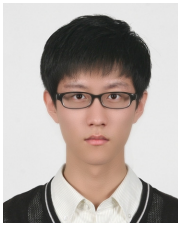
이 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 피탐지 감소기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다(과제번호 : LO-43).

References

- (1) Howarth, T. R., Varadan, V. K., Bao, X. Q. and Varadan, V. V., 1992, Piezocomposite Coating for Active Underwater Sound Reduction, Journal of Acoustical Society of America, Vol. 91, No. 2, pp. 823~831.
- (2) Lafleur, L. D., Shields, F. D. and Hendrix, J. E., 1991, Acoustically Active Surfaces Using Piezorzubber, Journal of Acoustical Society of America, Vol. 90, No. 3, pp. 1230~1237.
- (3) Chang, W., Kwon, D., Park, J. and Jeon, B., 2008, An Active Underwater Acoustic Reflection Control System, Proceeding IEEE MFI, pp. 583~587.
- (4) Braga, M. B., Honein, B., Barbone, P. E. and Herrmann, G., 1992, Suppression of Sound Reflected from a Piezoelectric Plate, J. Intell. Mater. Syst. Struct., Vol. 3, No. 2, pp. 209~223.
- (5) Scandrett, C. L., Shin, Y. S., Hung, K. C., Khan, M. S. and Lilian, C. C., 2004, Cancellation Techniques in Underwater Scattering of Acoustic Signals, Journal of Sound and Vibration, Vol. 272, No. 3, pp. 513~537.
- (6) Shields, F. D., 1993, Piezoelectric Panel Speaker, US005196755.

(7) Jang, H., Lee, K., Park, Y. and Seo, Y., 2014, A Single Sensor based Active Control of Acoustic Reflections, The 21st International Congress on Sound and Vibration, Beijing CH.

(8) Kuo, S. M. and Morgan, D. R., 1996, Active Noise Control Systems Algorithms and DSP Implementations, Wiley New York.



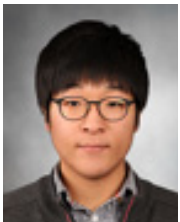
Jaepil Kim is received B.S. degrees in Information & telecommunication engineering from Yonsei University in 2015. He is currently in a M.S. candidate at the Computer science in Yonsei University. His research interests are in the Adaptive filter and Active noise control.



Youna Ji is received B.S. degrees in Information & telecommunication engineering from Yonsei University in 2011. He is currently in an integrated M.S. & Ph.D. candidate at the Computer science in Yonsei University. His research interests are in the Adaptive filter and Speech enhancement.



Youngcheol Park is currently a professor at Division of Computer telecommunications Engineering in Yonsei University, Korea. He received his B.S. degree, M.S. degree and the Ph.D. degree in Electrical & Electronic Engineering from Yonsei University, Korea, in 1986, 1988 and 1993, respectively. His research interests include Digital signal processing, Active control of sound, Adaptive filter and Echo reduction.



Enunghwy Noh is received B.S. degrees in mechanical engineering from Yonsei University in 2012. He is currently in an integrated M.S. & Ph.D. candidate at the mechanical engineering in Yonsei

University. His research interests are in engineering acoustics.



Won-Suk Ohm is currently a professor in the School of Mechanical Engineering at Yonsei University. He received his B.S. in mechanical engineering and mathematics (minor) at KAIST in 1994, and M.S.E. (1997) and Ph.D. (2001) at the UT-Austin. His research interests are in physical and engineering acoustics.



Yonggyu Choi is currently a deputy general manager at Createch Co., Ltd. He is received B.S. degrees in Multimedia Design from Dongseo University in 2003. His research interest is in the design of structures and machinery.



Daeup Kim is currently an assistant manager at Createch Co., Ltd. and in a M.S. candidate at the Naval architecture & Ocean engineering in Pusan National University. He is received B.S. degrees in Mechanical Engineering from Pukyong National University in 2010. His research interests are in the vibration & noise analysis and design of machinery.



Yong-Soo Seo is currently a senior researcher at Agency for Defense Development. He received the B.S. degree, M.S. degree and the Ph.D. degree in Mechanical Engineering from Pusan National University, Korea in 1999, 2001 and 2005, respectively. His research interests are in the reduction of noise in the ship.