

# 타일형 프로젝터를 이용한 저주파 능동 반향음 감소 기법

## Low-Frequency Active Echo Reduction Using a Tile Projector

이재완, 이상범, 장하다,\* 이근상,\* 김완구,\*\* 강희석,\*\* 엄원석,<sup>†</sup> 박영철,\* 윤석왕,\*\* 서영수\*\*\*

(Jae-Wan Lee, Sangbeom Woo, Hada Jang,\* Keunsang Lee,\* Wan-Gu Kim,\*\* Hwi-Suk Kang,\*\*  
Won-Suk Ohm,<sup>†</sup> Youngcheol Park,\* Suk Wang Yoon,\*\* and Youngsoo Seo\*\*\*)

연세대학교 기계공학부, \*연세대학교 컴퓨터정보통신공학부, \*\*성균관대학교 물리학과, \*\*\*국방과학연구소  
(접수일자: 2014년 9월 30일; 채택일자: 2014년 10월 23일)

**초 록:** 저주파 능동 소나를 이용한 잠수함 탐지 기술이 개발됨에 따라, 기존의 수동 무반향 타일을 대체할 새로운 잠수함 스텔스 기술이 요구되는 추세이다. 본 연구에서는 선체 표면과 같은 대면적에 적용 가능한 타일형 프로젝터를 이용하여 능동 임피던스 정합을 구현함으로써 저주파 반향음 감소를 도모하는 기법을 제안한다. 먼저 능동 임피던스 정합 기법의 기술적 타당성을 확인하기 위하여 유한요소 모델을 이용한 저주파 반향음 감소 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 바탕으로 타일형 프로젝터를 설계 및 제작하여 음향수조에서 저주파 반향음 감소 실험을 수행하였다.

**핵심용어:** 저주파, 반향음 감소, 타일형 프로젝터, 능동 임피던스 정합

**ABSTRACT:** With the advent of submarine detection technology using low-frequency active sonar there is a call for a new submarine stealth device that can replace the existing passive anechoic tiles. Proposed in this study is a low-frequency echo reduction technique based on active impedance matching, which employs a tile projector designed to cover a wide area such as the surface of a ship. To judge the feasibility of the active impedance matching technique finite-element simulations of low-frequency echo reduction are performed. Based on the analysis, a tile projector is designed, fabricated, and tested in an acoustic tank for its low-frequency echo reduction performance.

**Keywords:** Low-frequency, Echo reduction, Tile projector, Active impedance matching

**PACS numbers:** 43.50.Ki, 43.20.El

### 1. 서 론

수중에서 독자적으로 은밀한 작전을 수행하는 잠수함은 미래전 발원 양상 중 하나인 비대칭전의 핵심전력이라 할 수 있다. 이러한 잠수함에 있어 음향 스텔스 성능은 생존성과 직결되는 문제이다. 잠수함을 탐지하기 위한 대표적인 수단으로는 잠수함 자체에서 발생하는 음향 신호를 감지하는 수동 소나, 그리고 음파를 송신하고 돌아온 반향음을 수신하여 잠수함을 탐지하는 능동 소나를 들 수 있다. 기존의 잠수함은 이러한 탐지 수단들에 대한 대항책으로서 자함 음향신호 및 반향음 저감을 위한 무반향

타일을 사용해 왔다. 그러나 최근 저주파 능동 소나를 이용한 잠수함 탐지 기술이 개발됨에 따라 수십 cm에서 수 m에 달하는 두께의 무반향 타일을 부착해야 하는 문제점이 대두되었다. 기존의 무반향 타일은 해수와 유사한 음향 임피던스를 가진 타일내부로 입사파를 받아들인 후, 타일 내부에 포함된 기공 또는 첨가재를 이용해 음향 신호를 소산 또는 산란시킴으로써 반향음을 감소시킨다. 타일 내부에서 충분한 감쇠가 이루어지기 위해서는 이에 상응하는 충분한 전파 거리, 즉, 타일의 두께가 확보되어야 하며, 일반적으로 이 값은 입사파의 파장에 비례한다. 기존에 사용되던 수십 kHz 이상의 중고주파는 파장이 수 cm 이내이기 때문에 이에 상응하는 두께를 갖는 무반향 타일으로써 반향음 감소가 가능했으나, 최근 개

<sup>†</sup>Corresponding author: Won-Suk Ohm (ohm@yonsei.ac.kr)  
School of Mechanical Engineering, Yonsei University, 50 Yonsei-Ro,  
Seodaemun-Gu, Seoul 120-749, Republic of Korea  
(Tel: 82-2-2123-5819, Fax: 82-2-312-2159)

발되고 있는 저주파 능동 소나의 경우 파장이 수 m에 달하는 저주파수 대역을 사용하기 때문에 이에 대응할 수 있는 무반향 타일의 두께도 대폭 증가하게 된다. 따라서 기존 무반향 타일의 두께를 유지하면서도 저주파 대역에서 반향음을 감소시킬 수 있는 새로운 기술이 요구되고 있다. 저주파 능동 소나에 대항하는 음향 스텔스 기술로서 추가적인 제어음을 발생시켜 능동적으로 반향음을 감소시키는 기술에 대한 연구들이 수행되었다.<sup>[1-6]</sup> 대표적으로 Howarth et al.<sup>[1]</sup>은 톤필트 트랜스듀서와 1-3형 압전복합체 트랜스듀서를 이용해 반사면에서 능동 임피던스 정합을 이용으로써 반사파를 감소시키는 실험을 수행하였다. 이 외에 탄성 증합체에 압전물질을 혼합한 piezorubber를 사용한 Lafleur et al.<sup>[2]</sup>의 연구, 두 층의 압전복합체를 각각 압력센서와 액츄에이터로 사용한 Chang et al.<sup>[3,4]</sup>의 연구 등이 있다. 그러나 위 연구들은 상대적으로 작은 방사면을 갖는 액츄에이터를 사용하여도 파관 내 1차원 평면파 반향음의 제어만을 시도하여, 3차원적 반향음 제어 혹은 선체 표면과 같은 대면적에 적용이 어렵다는 한계를 가지고 있다.<sup>[1-4]</sup> 2차원 표면에서의 능동 반향음 감소 기술에 대해서는 적층 (laminated) 압전판에서의 반사파 감소에 대해 이론적으로 연구한 Braga et al.<sup>[5]</sup> 유한요소법과 유한차분법을 통해 점탄성 및 압전 물질을 이용한 수중 산란 신호의 감소에 관하여 연구한 Scandrett et al.<sup>[6]</sup>의 사례가 있으나 실제 실험까지 수행되지는 않았다.

본 연구에서는 대면적 적용 가능성을 고려한 타일형 프로젝터를 이용하여 능동적으로 저주파 반향음을 제어하는 기법을 제안한다. 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 본 연구의 핵심 개념인 능동 임피던스 정합과 타일형 프로젝터에 대해 기술하고, III장에서 위 개념의 기술적 타당성을 확인하기 위하여 유한요소해석 프로그램을 이용해 수행한 저주파 능동 반향음 감소 시뮬레이션에 대해 기술한다. IV장에서는 타일형 프로젝터의 제작 및 음향 수조에서 수행된 저주파 반향음 감소 실험에 대해 기술한다. 끝으로 V장에서 결론을 맺는다.

## II. 구성요소

### 2.1 능동 임피던스 정합

능동 임피던스 정합은 본 연구에서 저주파 반향음 제어를 구현하기 위한 핵심 요소로서, 물체 표면의 음향 임피던스를 능동적으로 매질의 임피던스와 일치시켜 반사가 일어나지 않도록 하는 기법이다. Fig 1(a)는 밀도  $\rho_0$ , 음속  $c_0$ 을 갖는 매질 내에서 음압  $P^+$ 를 갖는 입사파가 물체 표면에 입사하는 상황을 도시하고 있다. 매질의 고유 음향 임피던스  $Z_0$ 과 물체 표면의 음향 임피던스  $Z_n$ 의 차이에 의해 반사계수  $R_n$ 을 갖는 경우, 반향음의 음압  $P^-$ 와 입사속도  $U^-$ 는 다음과 같다.

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

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

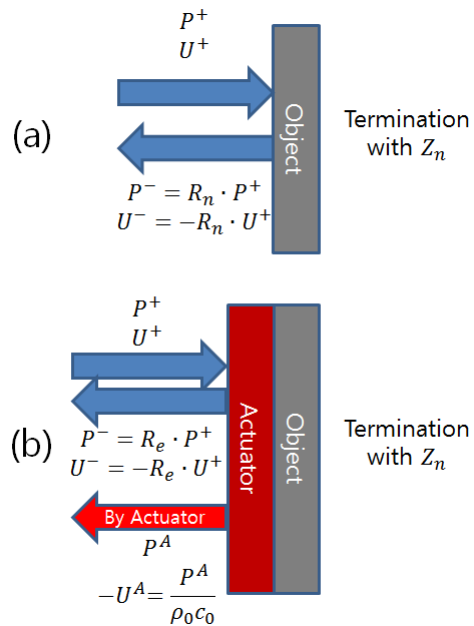


Fig. 1. Incident and reflected waves (a) at the passive interface (b) at the active interface.

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

제어음  $P^A$ 를 함께 고려한 액츄에이터 표면에서의 전체 음압  $P_{total}$ 과 전체 입자속도  $U_{total}$ , 그리고 이에 따른 전체 음향 임피던스  $Z_n$ 은 다음과 같다.

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

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

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

대표적인 몇 가지 제어음  $P^A$  값에 따른 표면에서의 전체 음압  $P_{total}$ 과 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  $P_{total}$ 은 입사파  $P^+$ 와, 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.

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)
$(1 - R_e) \cdot P^+$	$2P^+$	$\infty$ (Rigid)
$-(1 + R_e) \cdot P^+$	0	0 (Pressure release)

## 2.2 타일형 프로젝터

본 연구에서는 실선 대면적 적용에 적합한 능동 반향음 감소용 소자로서 타일형 프로젝터를 고려한다. 이와 유사한 형상 및 구조를 갖는 능동 타일이 제안된 바 있으나,<sup>[7]</sup> 제작되어 성능 시험까지 수행된 예는 보고된 바 없다. 타일형 프로젝터는 물과 유사한 음향 임피던스를 갖는 rho-c 고무를 기질(matrix)로 하고 그 내부에 다수의 단위 액츄에이터를 배열함으로써 마치 하나의 대형 프로젝터처럼 작동하는 구조를 갖는다. 타일형 기질은 해수와 유사한 고유 음향 임피던스를 가지고 있어 반향음의 고주파 성분을 감쇠하며, 저주파 성분의 제어는 액츄에이터를 이용한 능동 임피던스 정합을 통하여 이루어진다. 이러한 구조는 기존의 수동 무반향 타일의 두께를 유지하면서도 저주파를 포함한 광대역의 반향음을 제어할 수 있다는 장점을 갖는다. 나아가 다수의 타일형 프로젝터를 선체 표면에 2차원적으로 부착함으로써 대면적 반향음 감소 효과를 거둘 수 있을 것으로 예상된다.

## III. 저주파 능동 반향음 감소 시뮬레이션

### 3.1 유한요소해석 절차

본 연구에서는 타일형 프로젝터를 제작하고 저주파 반향음 감소 성능을 시험하기에 앞서, 유한요소해석 프로그램인 COMSOL Multiphysics(이하 COMSOL)를 이용하여 능동 반향음 제어 시뮬레이션을 수행하였다. COMSOL을 이용한 시뮬레이션 절차는 다음과 같다.

#### ① 타일형 프로젝터의 모델링 및 방사 특성 계산

본 연구에서는 타일형 프로젝터를 이용한 반향음 제어 시뮬레이션을 위해 음향 현상과 압전 현상을 연계하여 계산할 수 있는 음향-압전 상호작용, 과도해석모형을 사용하여 시간 종속 해석을 수행하였다. 또한 타일의 기질과 함체에 상응하는 백킹 물질에 대한 정확한 해석을 위해 선형 탄성 재료모형을 추가하였다. 계산 도메인은 크게 해수 영역, 타일형 프로젝터 영역, 백킹 물질 영역으로 구성되어 있다. 해수 영역의 경계는 모델에 따라 적합한 조건을 부여하였다. 해수의 물성치로는 밀도 1000 kg/m<sup>3</sup>, 음속 1500 m/s를

사용하였고, 백킹 물질의 재질로써 Steel AISI 4340을 사용하였다. 타일형 프로젝터 내부의 단위 트랜스듀서는 압전 소자 중 PZT-5H를 이용하여 모델링하고, 기질로서 해수와 거의 유사한 밀도와 음속을 갖는, 즉,  $\rho$ - $c$  고무를 모사한 사용자 정의 재료를 사용하였다. 위 재질의 물성치는 사전에 계산한 음향 투과 모델을 통해 구하였다. 모델링된 타일형 프로젝터의 방사 특성은 관심 주파수 대역의 참조 가진 전압으로 타일을 구동시킨 후, 타일 표면에서의 면적 평균 음압을 측정하고 이를 주파수 분석함으로써 획득하였다.

② 입사파 발생

타일형 프로젝터의 맞은편에서 입사파를 발생시킨 후, 타일 표면 근처에 위치한 두 지점에서 음압 파형을 획득한다. 두 지점은 입사파 발생원의 중심점과 타일의 중심을 잇는 선 상에 위치시켰으며, 각 지점 및 타일 간의 간격은 동일하게 설정하였다.

③ 유효 반사계수 계산 및 입사파/반사파 분리

위 ②에서 얻어진 두 지점의 음압 파형을 이용하여 유효 반사계수  $R_e$ 를 계산하고, 이로부터 입사파  $P^+$ 와 반사파  $P^-$ 를 분리한다.

④ 능동 임피던스 정합을 위한 액츄에이터 가진 전압 계산

분리된 입사파 및 반사파 파형과 위 ①에서 계산된 타일의 방사 특성을 이용하여 제어용  $P^A = -R_e \cdot P^-$ 를 발생시킬 수 있는 제어용 가진 전압을 계산한다.

⑤ 능동 임피던스 정합 구현 및 반향음 감소 확인

입사파가 타일에 도달하는 시점에 맞추어 위 ④에서 얻어진 가진 전압으로 액츄에이터를 구동하면 능동 임피던스 정합이 구현되어 반향음이 감소한다.

3.2 1차원 시뮬레이션

먼저 가장 기본적인 모델로서 1차원 도파관 내 반사파 감소 모델을 구성하여 능동 임피던스 정합의 타당성을 확인하였다. 파장에 비해 충분히 작은 너비에 충분히 긴 길이를 갖는 도파관을 상정하고, 그 끝단에 타일형 프로젝터를 배치하였다. 도파관의 시작으로부터 음향 신호가 입사할 때 능동 임피던스 정합 여부에 따른 반사파의 변화를 관찰하였다. Fig. 2는 도파관의 시작에서 계산된 음향신호를 나타내

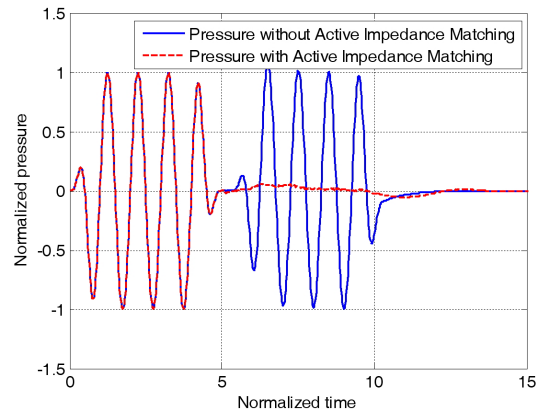


Fig. 2. Pressure-time waveforms computed near the source in the 1D model (—: without active impedance matching, - -: with active impedance matching).

고 있는데, 실선은 능동 임피던스 정합이 작동하기 전, 파선은 능동 임피던스 정합이 작동하는 경우이다. 신호의 앞부분은 도파관 시작에서 발생한 입사파를 나타내며, 뒷부분은 끝단에서 돌아온 반사파를 나타내고 있다. 능동 임피던스 정합이 작동하면 매우 큰 폭으로 반사파의 크기가 감소함을 확인할 수 있었다. 위 결과는 도파관 내 능동 반사파 제어에 대한 기존 연구 결과<sup>[14]</sup>와도 일치하였다.

3.3 2차원 시뮬레이션

1차원 해석 결과를 통해 능동 임피던스 정합 기법의 기술적 타당성을 확인한 후, 타일형 프로젝터를 이용한 2차원 자유 음장 내에서의 반향음 감소 시뮬레이션을 수행하였다.

3.3.1 단일 타일형 프로젝터의 경우

단일 타일형 프로젝터의 경우는 IV장에서 기술된 타일형 프로젝터의 성능 실험의 경우와 가장 유사하다. Fig. 3과 같이 타일형 프로젝터를 자유 음장의 한 가운데 배치하고 타일의 맞은 편으로부터 입사파를 발생시킨 후 능동 임피던스 정합 여부에 따른 반향음 감소 효과를 살펴보았다. Fig. 3은 제어 여부에 따른 2차원 음압 분포이며, Fig. 4는 발생 위치에서 계산된 음향 신호이다. 2차원 자유 음장 시뮬레이션의 경우, 원통형파 확산에 의한 기본적인 반향음 감쇠가 존재한다. 그러나 능동 임피던스 정합이 구현될 때는 확산에 의한 감쇠 이외에 제어에 의한 추가적인

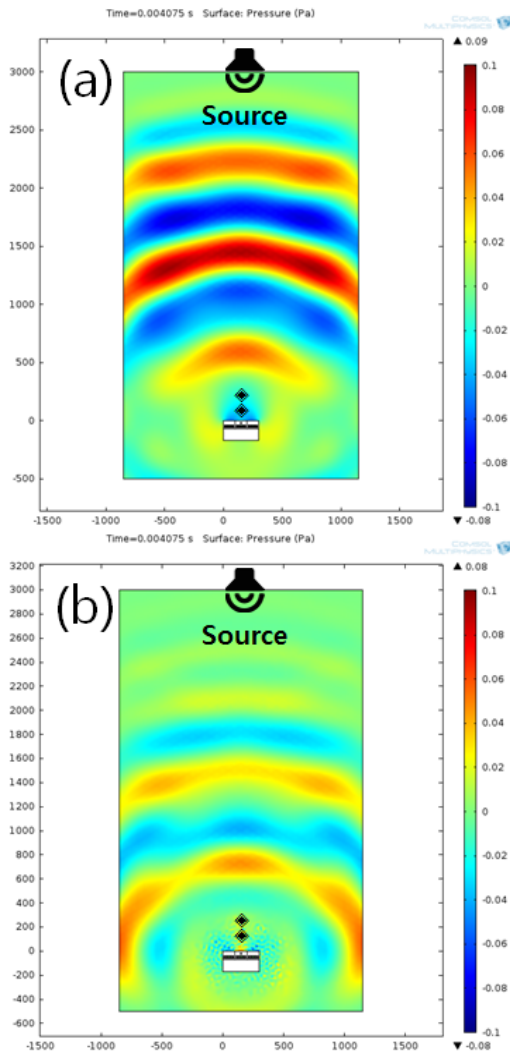


Fig. 3. Acoustic pressure distribution in the 2D model with a single tile projector (a) without active impedance matching (b) with active impedance matching.

감소가 관찰된다. 단, 타일 모서리에서의 회절과 일부 임피던스 부합함에 기인하여 1차원 시뮬레이션만큼의 감소 효과를 얻을 수는 없었다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 복수의 타일형 프로젝터를 넓은 면적에 연속적으로 부착하는 방법, 혹은 입사파 파장 대비 넓은 방사면적을 갖는 타일형 프로젝터의 이용을 고려할 수 있다.

### 3.3.2 복수 타일형 프로젝터의 경우

여기서는 대면적에 복수의 타일형 프로젝터를 연속적으로 배치함으로써 회절 효과에 의한 성능 저하를 피하고 대면적에서의 전반적인 반향음 감소 성능

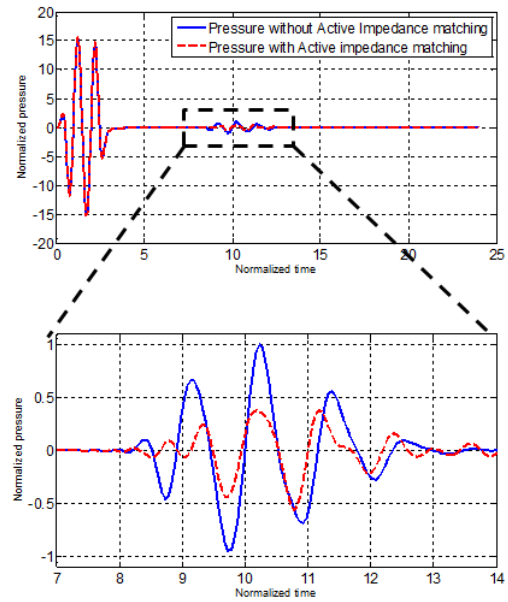


Fig. 4. Pressure-time waveforms computed near the source in the 2D model with a single anechoic tile (—: without active impedance matching, - -: with active impedance matching).

을 얻는 것을 그 목적으로 한다. 복수의 타일형 프로젝터에 의한 반향음 저감 성능을 예측하기 위해 Fig. 5에서와 같이 COMSOL 상에서 주기적 조건을 부여해 하나의 평면에 복수의 타일형 프로젝터가 연속적으로 배치되어 있는 것과 동일한 효과를 갖는 모델에 대한 해석을 수행했다. 본 논문에서 고려하는 능동 소나에 의한 탐지음은 소나로부터 구면파 형태로 전파가 시작되나 충분한 거리를 전파한 이후에는 평면파로 간주할 수 있기 때문에, 시뮬레이션의 계산 효율을 위하여 입사파에 평면파 조건을 부여하였다. 능동 임피던스 정합 전과 후의 2차원 음압 분포를 Fig. 5에, 음원의 위치에서 계측된 음향 신호를 Fig. 6에 나타내었다. 이 경우 1차원 시뮬레이션 결과와 같이 반향음이 대폭 감소하는 결과를 확인할 수 있었다.

## IV. 타일형 프로젝터의 제작 및 성능 실험

### 4.1 타일형 프로젝터의 제작

Fig 7은 실험을 위해 실제로 제작된 타일형 프로젝터이다. 9개의 단위 액츄에이터를 3×3 배열로 배



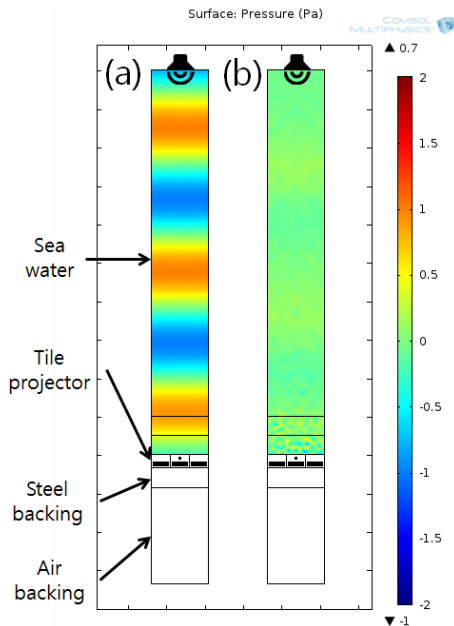


Fig. 5. Acoustic pressure distribution in the 2D model with a multitude of tile projectors (a) without active impedance matching (b) with active impedance matching.

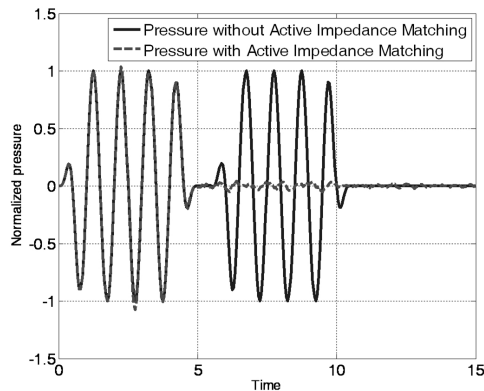


Fig. 6. Pressure-time waveforms computed near the source in the 2D model with a multitude of tile projectors (—: without active impedance matching, - - -: with active impedance matching).

치한 후, 전체를 rho-c 고무를 이용해 수 cm 두께의 타일형 직육면체로 몰딩한 구조이다. 단위 액츄에이터로는 링형 플렉서블 트랜스듀서(ring-type flexural transducer)를 자체적으로 설계 및 제작하여 사용하였다. 위 방식의 트랜스듀서는 링형 압전소자의 길이 방향 움직임을 얇은 금속판의 휨 움직임으로 변형시킴으로써 작은 크기에 비해 상대적으로 우수한 저주파 방사 특성을 갖는 장점이 있다. 또한 rho-c 고무를 통하여 구조적으로 서로 연결되어 마치 하나의

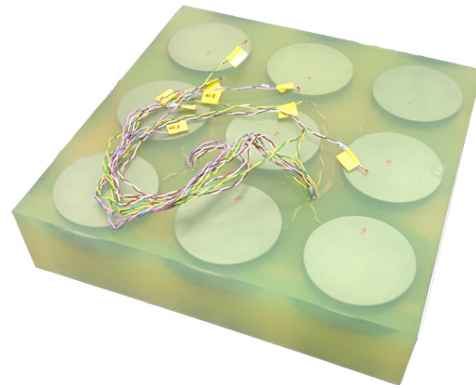


Fig. 7. A tile projector.

대형 트랜스듀서처럼 작동함으로써 저주파 방사 특성이 증대되는 효과를 얻을 수 있다. 9개의 단위 액츄에이터들은 전선으로 연결하여 동일한 전기 신호로 가진될 수 있게 하였다. 타일형 프로젝터가 부착될 물체로서는 6mm 두께의 스테인리스 철판을 사용하였다. 측정을 통해 타일형 프로젝터의 방사 특성을 확인한 결과, 중심 주파수는 관심 주파수 대역보다 높은 대역에서 나타났으며 방사 효율은 중심 주파수로부터 주파수가 낮아질수록 단조 감소하는 경향을 보였다.

#### 4.2 능동 반향음 감소 실험

타일형 프로젝터를 이용한 저주파 반향음 감소 실험은 벽면에 무반향 처리가 된 음향 수조(연속음파 사용 시 최저 임계진동수 15 kHz)에서 수행되었다 (Fig. 8). 실험을 위한 장비의 구성은 Fig 9와 같다. 수조의 한쪽 벽면에 위치한 프로젝터(Model F33, ACTRAN Systems Inc.)는 함수 발생기(Model 33250A, Agilent)와 연결하여 입사파를 발생시키기 위해 사용되었고, 타일형 프로젝터는 F-33 프로젝터와 마주볼 수 있도록 동일한 X 축 상에 설치하였다. 고정된 위치의 참조 하이드로폰(reference hydrophone)은 반향음의 검출 및 제어를 위해 사용되었고, 이동 하이드로폰(moving hydrophone)은 각 위치에 따른 반향음 변화를 측정하기 위해 사용되었다. 프로젝터와 타일형 프로젝터 간의 거리는 185 cm이며, 참조 하이드로폰은 편의상 F-33 프로젝터와 타일형 프로젝터를 잇는 X 축 상에서 입사파와 반향음을 각각 분리하여 관찰할 수 있도록 타일형 프로젝터로부터 110 cm 떨어진 위치에 배치하였다. 2개의 하이드로폰에서 측정된 신호는

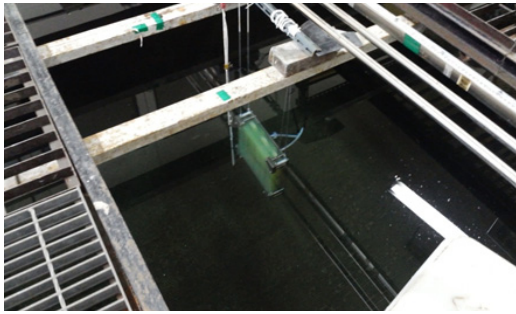


Fig. 8. A tile projector installed in an anechoic water tank.

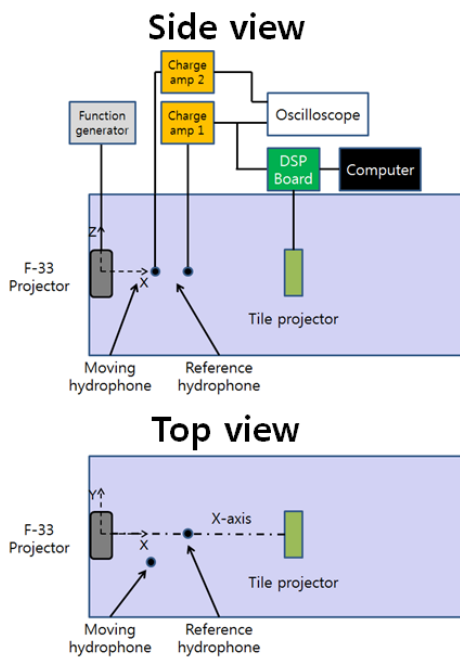


Fig. 9. A setup for the echo reduction experiment using an tile projector (side & top views, respectively).

신호 증폭기(Model 2635 Charge Amplifier, B&K)에서 증폭되어 오실로스코프에서 관찰 및 기록되었으며, 이 중 참조 하이드로폰의 신호는 제어용 컴퓨터와 연결된 DSP 보드에 입력되어 반향음 감소를 위한 제어 신호 생성에 사용되었다.

반향음 감소 실험의 과정은 다음과 같다.

- ① F-33 프로젝터로부터 광대역의 성분을 갖는 백색 잡음을 방사했을 때 참조 하이드로폰에서 측정된 입사파 및 반사파를 이용하여 타일형 프로젝터의 유효 반사계수  $R_e$ 를 주파수의 함수로서 획득한다.
- ② F-33 프로젝터로부터 능동 반향음 감소 실험을

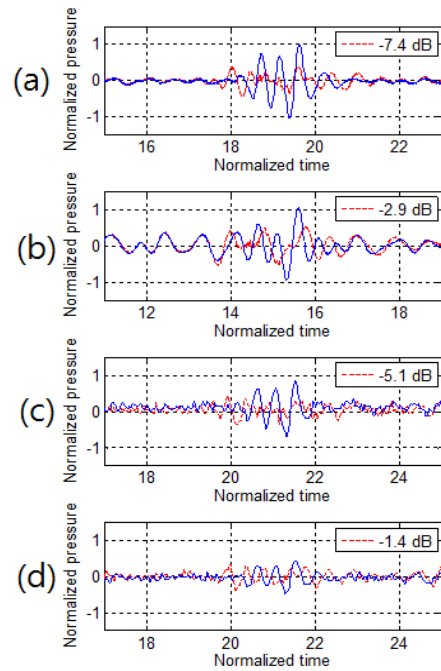


Fig. 10. Pressure-time waveforms of reflected waves (—:without active impedance matching, - - :with active impedance matching) (a) at the reference hydrophone ( $X = 0.75$  m,  $Y = 0$ ) (b) at the moving hydrophone near the tile projector ( $X = 1.45$  m,  $Y = 0$ ) (c) at the moving hydrophone near the F-33 projector ( $X = 0.3$  m,  $Y = 0$ ) (d) at the moving hydrophone 0.2 m off the X-axis ( $X = 0.3$  m,  $Y = 0.2$  m)

위한 입사파를 발생시킨 후, 능동 임피던스 정합 전의 타일형 프로젝터로부터의 반향음을 측정한다.

- ③ 다음, 제어용 컴퓨터와 DSP 보드는 미리 획득한 유효 반사계수  $R_e$ 와 참조 하이드로폰에서 감지되는 입사파 신호를 이용해 능동 임피던스 정합을 구현할 수 있는 제어 신호를 타일형 프로젝터에 인가한다.
- ④ 참조 하이드로폰에서의 반향음 감소를 확인하고, 이동 하이드로폰을 이용하여 수조 내 여러 위치에서의 반향음 감소 여부를 확인한다.

Fig 10에 능동 반향음 감소 실험의 결과를 나타내었다. 실선과 파선은 각각 반향음 제어를 하지 않는 경우와 제어를 하는 경우의 반향음 신호를 나타내고 있다. Fig 10(a)는 참조 하이드로폰에서의 반향음 신호를 나타내고 있다. Fig 10(b)는 X축 상에서 참조 하이드로폰보다 타일형 프로젝터에 가까운 위치에서,

(c)는 먼 위치 위치에서 측정된 신호이다. (d)는 (c)의 위치에서 Y 방향으로 0.2 m 벗어난 위치에서 측정된 신호이다. 제어 대상인 참조 하이드로폰에서 7.4 dB의 가장 큰 감소를 보였으며 다른 위치에서도 전반적으로 3~6 dB의 반향음 감소를 확인하였다. 단, 시뮬레이션에서 예측된 바와 같이 타일의 모서리에 의해 발생하는 회절파의 영향으로 인해 Fig. 10(d)에서와 같이 축에서 벗어난 위치의 경우 반향음 감소 성능이 다소 저하되는 결과를 보였다. 한편, 본 실험에서는 참조 하이드로폰을 타일형 프로젝터 부근에 위치시키지 못했으나, 추후 참조 하이드로폰이 rho-c 고무 기질 내에 포함되어 기존의 타일 두께를 유지하면서도 저주파 및 고주파를 모두 포함하는 광대역의 반향음을 모두 감소시킬 수 있는 능동 반향음 제어 타일을 개발하고자 한다.

## V. 결 론

본 논문에서는 타일형 프로젝터를 이용한 수중 저주파 반향음 감소 기법을 제안하였다. 타일형 프로젝터의 표면에서 능동 임피던스 정합을 구현함으로써 표면에서의 반향음을 감소시키는 원리이다. 먼저 유한요소 해석 프로그램을 이용해 1차원 및 2차원 모델에 대한 시뮬레이션을 수행하여 능동 임피던스 정합 기법과 타일형 프로젝터의 기술적 타당성을 확인하였다. 그리고 이를 바탕으로 타일형 프로젝터를 제작하여 음향 수조에서 반향음 감소 실험을 수행하였다. 그 결과 타일형 프로젝터에 의한 3~7 dB 범위의 반향음 감소 효과를 확인하였다. 단, 타일의 모서리에서 발생하는 회절 현상에 의해 반향음 감소 성능이 저하하는 것을 확인하였다. 추후 참조 하이드로폰을 타일형 프로젝터의 rho-c 고무 기질에 포함하는 일체형 반향음 제어 타일을 제작할 예정이며, 복수의 타일형 프로젝터를 연속적으로 배치함으로써 대면적에 대한 능동 반향음 감소를 구현하는 실험 또한 수행할 계획이다. 이 경우 본 연구에서 단일 타일을 사용함에 따라 발생한 회절 등에 의한 성능 저하가 크게 개선될 것으로 예상된다. 또한 본 연구는 능동 반향음 감소 시스템 구축을 위한 초기 단계 시험으로서 표면에 수직으로 입사하는 탐지음만을 고

려하였으나, 추후 연구에서는 비스듬하게 입사하는 탐지음에 대한 제어도 가능하도록 제어 기법을 개선할 계획이다.

## 감사의 글

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

## References

1. T. R. Howarth, V. K. Varadan, X. Q. Bao, and V. V. Varadan, "Piezocomposite coating for active underwater sound reduction," *J. Acoust. Soc. Am.* **91**, 823-831 (1992).
2. L. D. Lafleur, F. D. Shields, and J. E. Hendrix, "Acoustically active surfaces using piezorubber," *J. Acoust. Soc. Am.* **90**, 1230-1237 (1991).
3. W. Chang, D. Kwon, J. Park, and B. Jeon, "An active underwater acoustic reflection control system," *Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, 2008. MFI 2008. IEEE International Conference on, 583-587 (2008).
4. W. S. Chang and D. R. Gweon, "Study on sound reflection control using an active sound absorber" (in Korea), *J. Acoust. Soc. Kr.* **28**, 806-814 (2009.)
5. M. B. Braga, B. Honein, P. E. Barbone, and G. Herrmann, "Suppression of sound reflected from a piezoelectric plate," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **3**, 209-223 (1992).
6. C. L. Scandrett, Y. S. Shin, K. C. Hung, M. S. Khan, and C. C. Lilian, "Cancellation techniques in underwater scattering of acoustic signals," *J. Sound Vib.* **272**, 513-537 (2004).
7. F. D. Shields, *Piezoelectric Panel Speaker*, US005196755, (1993).

## 저자 약력

▶ 이 재 완 (Jae-Wan Lee)



2010년: 연세대학교 기계공학과(학사)  
2010년 ~ 현재: 연세대학교 기계공학과  
(통합과정)



▶ 우 상 범 (Sangbeom Woo)



2013년: 연세대학교 기계공학과(학사)  
2013년 ~ 현재: 연세대학교 기계공학과  
(석사과정)

▶ 엄 원 석 (Won-Suk Ohm)



1994년: KAIST 기계공학과(학사)  
2001년: University of Texas at Austin(공학  
박사)  
2002년~2005년: 캐나다 표준과학연구원  
(NRC-INMS) 객원연구원  
2006년~2008년 2월: (주) 메디슨 선임  
연구원  
2008년~ 현재: 연세대학교 기계공학부 교수

▶ 장 하 다 (Hada Jang)



2012년: 연세대학교 컴퓨터정보통신공학  
부(학사)  
2012년 ~ 현재: 연세대학교 전산학과(석  
사과정)

▶ 박 영 철 (Youngcheol Park)



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

▶ 이 근 상 (Keunsang Lee)



2006년: 연세대학교 정보기술학부(학사)  
2010년: 연세대학교 전산학과(석사)  
2010년 ~ 현재: 연세대학교 전산학과(박사  
과정)

▶ 윤 석 왕 (Suk Wang Yoon)



1975년: 서강대학교 물리학과(학사)  
1978년: 서강대학교 물리학과(석사)  
1983년: The University of Texas at Austin,  
Department of Physics Ph.D.  
1985년 ~ 현재: 성균관대학교  
물리학과 교수  
1996년 ~ 현재: 미국음향학회 Fellow

▶ 김 완 구 (Wan-Gu Kim)



2007년: 성균관대학교 자연과학부 물리학  
전공(학사)  
2011년: 성균관대학교 물리학과(석사)  
2011년 ~ 현재: 성균관대학교 물리학과  
(박사과정)

▶ 서 영 수 (Youngsoo Seo)



1999년: 부산대학교 기계공학부(학사)  
2001년: 부산대학교 기계설계공학과(석사)  
2005년: 부산대학교 기계설계공학과(박사)  
2006년 ~ 현재: 국방과학연구소 선임연구원

▶ 강 휘 석 (Hwi-Suk Kang)



2014년: 성균관대학교 물리학과(학사)  
2014년 ~ 현재: 성균관대학교 물리학과  
(석사과정)