

## 광대역 수중 스피커 시스템의 설계 및 성능 특성

이대재\*

부경대학교 해양생산시스템관리학부

# Design and Performance Characteristics of a Broadband Underwater Speaker System

Dae-Jae Lee\*

*Division of Marine Production System Management, Pukyong National University,  
Busan 608-737, Korea*

An underwater speaker was developed for use as an acoustic deterrent device that transmits acoustic energy through the water omnidirectionally over a broadband frequency range to eliminate marine mammal attacks and to prevent physical damage to the inshore and coastal fishing grounds of Korea. The underwater speaker was constructed of two vibration caps machined from 6061-T6 aluminum alloy and a stack of PZ 26 piezoelectric ceramic rings (Ferroperm Piezoceramics A/S) connected mechanically in series and electrically in parallel. The performance characteristics of the underwater speaker were measured and analyzed in an experimental water tank of 5 m×5 m×6 m. The peak transmitting voltage response (TVR) was measured at 11.16 kHz with 163.45 dB re 1 μPa/V at 1m. The underwater speaker showed a near omnidirectional beam pattern at the peak TVR resonance frequency. The usable frequency range was 4-25 kHz with a lower TVR limit of approximately 140 dB. We conclude that this underwater speaker could be satisfactorily used as an acoustic deterrent device against marine mammals, particularly the bottlenose dolphin, to protect catches and fishing grounds as well as the mammals themselves, for example, by keeping them away from fishing gear and/or vessels.

**Key words:** Underwater speaker, TVR, Broadband frequency, Marine mammals, Acoustic deterrent device

## 서 론

최근 우리나라 주변수역에서는 해양포유동물, 특히, 돌고래(dolphin)의 자원밀도(개체수)가 급격히 증가함에 따라 이들 돌고래가 연근해 어장에 출현하는 빈도가 해를 거듭할수록 증가하고 있어 연근해 어장에 설치된 자망, 가두리, 정치망 등과 같은 정치성 어구에 혼획되거나 이들 어구를 파망시키는 사례가 증가하고 있다. 특히, 오징어 채낚기 어장에 있어서는 집어등에 의해 유집한 오징어 어군을 포식하기 위해 출현함으로써 오징어 어군의 군 형성 및 어업 생산성을 저해하는 등 어민들의 어로활동에 막대한 피해를 초래하고 있어 이에 대한 대책의 수립이 절실히 요구되고 있다(Lee et al., 2005). 이와 같은 문제는 비단 우리나라에서만 문제가 아니라, 유럽 및 북미 여러 나라에서도 유사한 현상이 발생하고 있는데, 이들 나라에서는 특히, 자망 어구의 경우, 돌고래의 혼획 방지와 돌고래의 접근을 차단 및 퇴치하기 위한 초음파 쾨거 장치, 즉 ADD(acoustic deterrent device)의 강제적인 사용이 법제화되어 시행되고 있다(Barlow et al., 2003; Gearin et al., 2000; Richard, 2005). 일반적으로 돌고래류, 고래류(cetacean), 기각류(pinnipeds)와 같은 해양포유동물에 있어

서는 명음(vocalization)의 발생과 수신에 이들 생물들의 생존과 직결되는 정보전달 및 먹이의 탐지수단(echolocation)인데, 명음은 clicks(pulsed sounds) 음과 whistles(unpulsed sounds) 음으로 대별된다. 보통, 클릭음은 매우 짧은 단속적인 펄스 음으로서 섭이 생물의 탐지 및 마비, 항행, 구애, 방어공격, 공포 및 재난신호와 같은 정보전달 등을 위해 사용하고, whistles and squeaks 음은 수 초간 지속되는 음으로서 주로, 음향학적 학습(acoustic imprinting), 즉 어미가 새끼를 훈육하거나, 새끼가 어미를 식별하기 위한 의사전달 음이다. 우리나라 주변수역에 가장 널리 분포하고 있는 병코 돌고래(bottlenose dolphin)의 경우, 주로 많이 관측되는 click 음의 주파수는 15-130 kHz의 범위이고, whistle 음은 그 주파수가 3.5-14.5 kHz의 범위이다. 이 때문에 현재 유럽이나 미국 등의 여러 나라에서는 10 kHz의 단일 주파수 ADD와 20-160 kHz 범위의 광대역 ADD의 사용을 법제화하고 있으나, 이들 ADD 방성음의 지속시간은 300 ms로 같지만, 그 음원강도는 10 kHz ADD의 경우, 미국에서는 132 dB, EU에서는 140-150 dB, 또한, 20-160 kHz ADD(EU)의 음원강도는 145 dB로 규정하고 있다(Gordon et al., 2002; Richard, 2005). 이와 같이 ADD의 음원강도를 매우 낮게 법제화한 이유는 해양포유동물에 지나친 음 자극이 가해지지 않도록 하기 위함이며, 돌고래의 접근을 퇴치하는데 필요한 최소한의 레벨만

\*Corresponding author: daejael@pknu.ac.kr

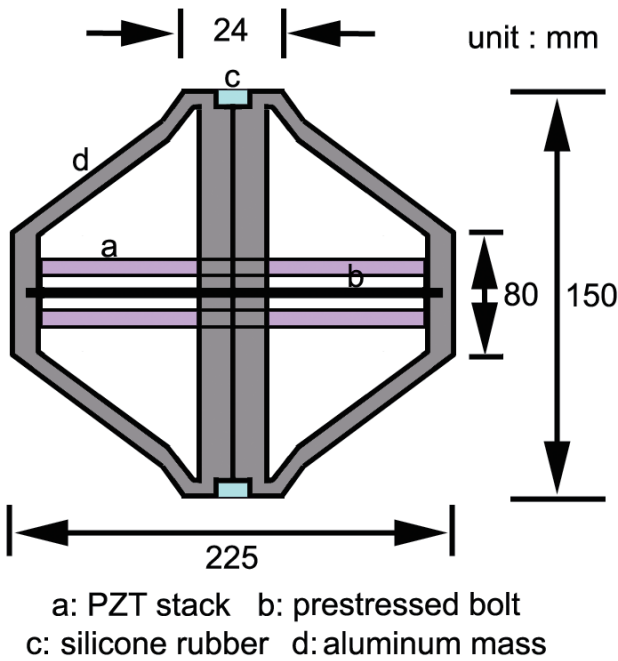


Fig. 1. Block diagram of a broadband underwater speaker developed in this study.

을 규정하고 있다. 그러나, 본 연구자가 이들 ADD를 우리나라의 오징어 채낚기 어선에서 시험한 결과, 오징어 어군을 향해 물러드는 돌고래를 일시적으로 차단할 수는 있었으나, 음원강도가 매우 낮은 관계로 일정 시간이 경과한 후에는 학습효과에 의해 큰 효과를 발휘하지 못하였고, 이로 인해 돌고래에 의한 오징어 어군의 섭이가 반복적으로 자행됨으로써 이에 위협을 받은 오징

어 어군이 집어등의 광원 범위 밖으로 도피하는 문제점이 있음을 파악할 수 있었다. 따라서, 본 연구에서는 이와 같은 문제점에 주목하여 넓은 주파수 범위에서 작동하면서도 강력한 음원출력을 발생시켜 사용자가 출력과 주파수를 어장 상황에 따라 자유롭게 선택하여 사용할 수 있는 광대역 수중 스피커 시스템을 설계, 제작하고, 그 성능 특성을 분석, 평가하였다.

### 재료 및 방법

#### 수중 스피커의 설계, 제작

본 연구에서는 우리나라 연안 해역에 설치 운용되고 있는 자망, 정치망 등과 같은 고정 어구류에 돌고래가 어획되어 폐사하는 것을 방지하고, 또한 오징어 채낚기 어장에서 집어등 불빛에 유입된 오징어를 섭이하기 위해 접근하는 돌고래를 차단 및 퇴치하기 위한 초음파 방성 시스템을 독자적으로 개발하기 위해 초음파 진동체의 형상과 구조를 반복적으로 변경하면서 목적하는 주파수 범위를 갖는 광대역의 수중 스피커를 설계, 제작하였는데, 그 구조의 모식도는 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 알 수 있는 바와 같이 수중 스피커의 형상은 알루미늄으로 제작한 버섯 갓 모양의 진동체 두 개를 서로 맞대어 접합시킨 구조로서, 이 진동체의 직경과 길이는 각각 150 mm, 225 mm이다. 또한, 양측 삿갓의 봉우리는 직경 80 mm의 평판형 구조로서 이들 두 진동체는 서로 동일하고, 재질은 알루미늄 6061-T6로 제작되었다. 수중 스피커는 이들 삿갓 진동체 내부에 외경 21.7 mm, 내경 12.5 mm, 두께 10.3 mm의 링(ring)형 압전소자(Pz 26, Ferroperm Piezoceramics A/S, Denmark) 10개를 적층하여 제작한 PZT stack을 억압볼트(prestressed bolt)에 의해 삽입, 접착시키고,

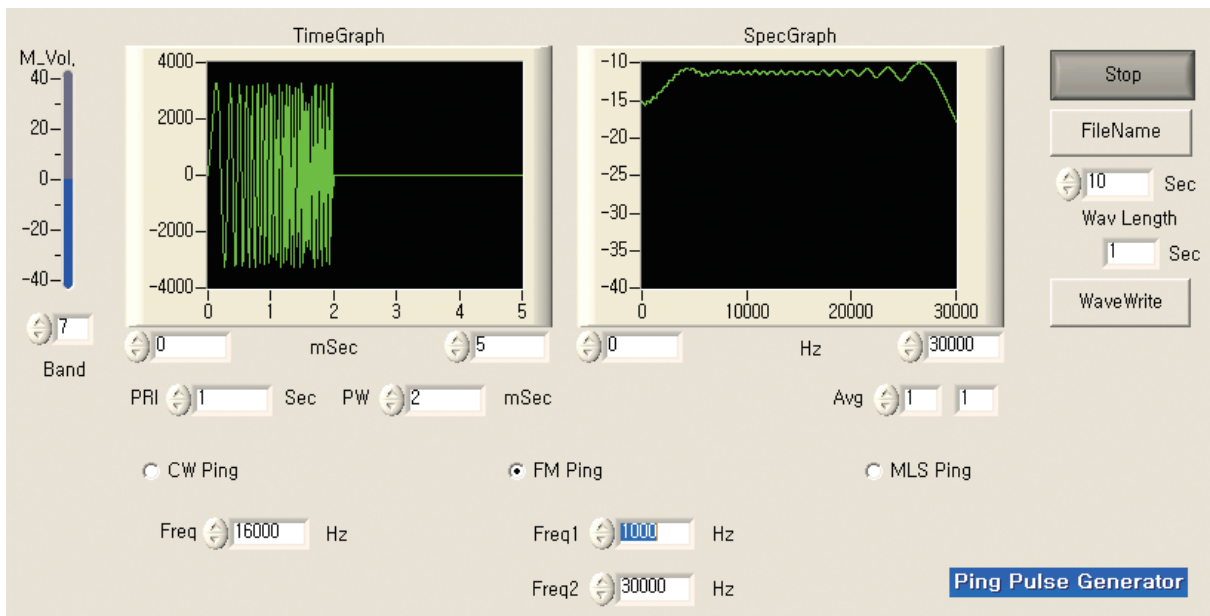


Fig. 2. Layout of control window for the program developed in order to generate the chirp pulse signal for driving a broadband underwater speaker.

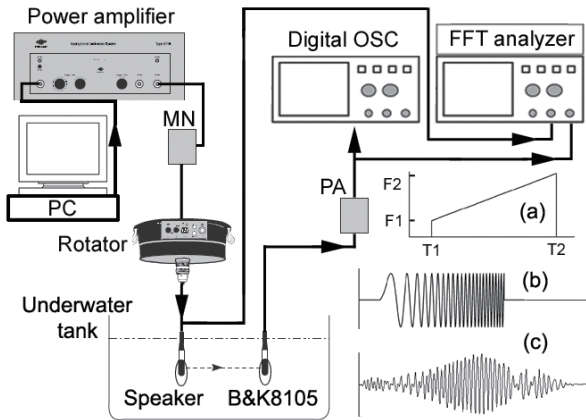


Fig. 3. Schematic diagram of the experimental setup for measuring the underwater performance characteristics of a developed broadband underwater speaker. (a) Diagram of time and frequency in LFM signal, (b) Transmitted chirp pulse, (c) Received chirp response.

Fig. 1에서와 같이 PZT stack을 양측 샷갓 진동체와 강력하게 체결함으로써 완성하였다.

### 실험장치의 구성 및 성능측정

본 연구에서 설계, 개발한 수중 스피커 시스템의 성능특성을 측정하기 위한 프로그램의 제어 window와 실험장치의 구성도는 각각 Fig. 2 및 Fig. 3과 같다. 본 연구에서는 측정 주파수가 가청 주파수 범위인 점을 고려하여 일반 PC(sense X-20, 삼성)에 내장되어 있는 audiocard를 사용하여 음향신호를 발생시켰는데, 이를 위해 작성된 프로그램의 제어 window는 Fig. 2와 같다. 먼저, 공기중 및 수중에 있어서의 전기적인 임피던스(또는 어드미턴스)는 정밀 LCR meter(Model 7600, QuadTech, USA)를 이용하여 측정하였다. 수중 스피커의 송파전압감도(transmitting voltage response, 이하 TVR이라 한다.)는 chirp 신호를 이용하여 실험수조(L×B×D, 5 m×6 m×5 m)에서 측정하였다.

실험은 Fig. 3에서와 같이 펄스폭 2.0 ms, 주파수 범위 1-30 kHz, 펄스반복주기 1 sec의 chirp 펄스신호를 PC에서 발생시켜 audiocard를 통해 전력증폭기(Model 2713, B&K, Denmark)에서 증폭한 후, 이 신호를 matching transformer를 통하여 수중 스피커에 입력하였다. 수중 스피커에서 발사된 송신 펄스신호는 수중청음기(Model 8105, B&K, Denmark)을 사용하여 수신하였고, 이 신호를 charge amplifier(Model 2635, B&K, Denmark) 및 measuring amplifier(Model 2610, B&K, Denmark)를 경유하여 digital storage oscilloscope(DS-1230, Ezdigital, Korea) 및 FFT analyzer(Model 3525, AND, Japan)에 입력하였다. 실험은 송신 및 수신신호를 관찰하면서 FFT analyzer를 통해 송신 및 수신 신호에 대한 시간응답신호와 주파수 스펙트럼을 각각 측정, 수록하고, 이들 주파수 스펙트럼을 비교, 분석하여 1-25 kHz 주파수범위에 대한 송파전압감도를 구하였다.

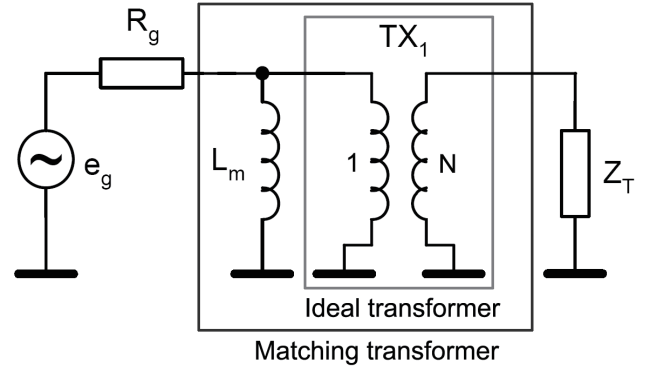


Fig. 4. Equivalent circuit for low frequency region of impedance matching transformer.

### 임피던스 matching transformer의 제작

일반적으로 수중 스피커에서와 같은 가청 주파수 대역의 음원장치에 대한 matching transformer의 저주파수 대역 등가회로는 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있는데(Svilainis et al., 2006), Fig. 4에서  $e_g$ 는 수중 스피커에 입력된 전압,  $Z_T$ 는 수중 스피커의 임피던스,  $TX_1$ 은 권선비 1 : N의 ideal transformer,  $L_m$ 은 matching transformer의 1차측 코일의 인덕턴스,  $R_g$ 는 수중 스피커를 구동하는 전력 증폭기의 출력저항, 즉, 음원의 저항(source resistance)이다. Fig. 4에서와 같이 audio transformer의 저주파수 대역에 대한 음향신호를 최대의 출력으로 송출하기 위해서는 transformer의 1 차측 권선에 대한 여자전류(excitation current)를 감소시켜야 하는 데(Whitlock, 2006), 이를 위해서는 1 차측 코일의 인덕턴스, 즉 자화 인덕턴스(magnetizing inductance)  $L_m$ 을 크게 할 필요가 있기 때문에 본 연구에서는(1) 식을 이용하여  $L_m$ 값을 먼저 산출하였다(Svilainis et al., 2007).

$$L_m = \frac{10 R_g}{\omega_s} \quad (1)$$

(1) 식에서  $\omega_s$ 는  $\omega_s = 2\pi f_s$ 로서, 는 수중 스피커가 구동되는 하한 주파수(lowest applicable frequency)이다. (1) 식으로부터  $L_m$ 값을 산출한 후, Fig. 4에서 수중 스피커의 임피던스  $Z_T$ 를 전력 증폭기의 임피던스  $R_g$ 에 matching 시키기 위한 matching transformer의 권선비 N를(2) 식으로부터 산출하여 2 차측 코일의 인덕턴스를 구하였다.

$$N = \sqrt{\frac{|Z_T|}{R_g}} \quad (2)$$

이와 같이 산출된 1 차측 및 2 차측 인덕턴스, 권선비를 토대로 ferrite pot core를 사용하여 임피던스 matching transformer를 제작하였는데, 사용한 pot core의 재질과 크기는 각각 H5C2, OD 45 mm×H 29 mm(P4529, TDK, Japan)이다. 최종적으로는(1) 식과(2) 식에 의해 산출한 파라미터를 변화시키면서 본 연구에서 개발한 수중 스피커로부터 최대의 음향출력이 방출되는

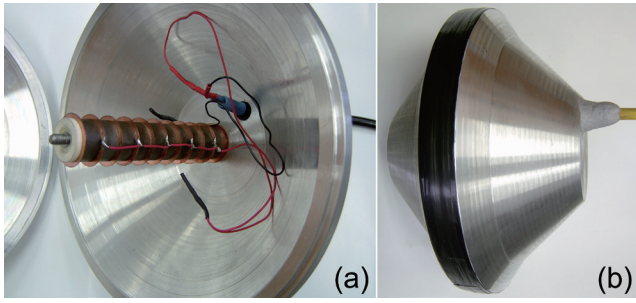


Fig. 5. Photographs for opened modules of underwater speaker consisting of two aluminum masses and a PZT stack (a) and a completed broadband underwater speaker (b).

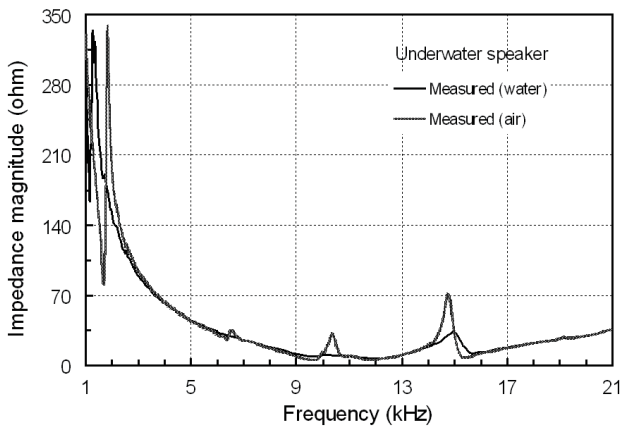


Fig. 6. Comparison of magnitude curves for electrical impedance measured in air and in water of a developed broadband underwater speaker.

transformer의 설계 파라미터를 도출하였는데, 그 권선비와 1 차 측 인덕턴스 값은 각각 13.4 mH, 141.8 mH이었고, 본 연구에서는 이 값을 적용한 임피던스 matching transformer를 제작하여 사용하였다.

### 결과 및 고찰

#### 수중 스피커 시스템의 구조적 특성

본 연구에서 설계, 개발한 광대역의 수중 스피커와 스피커 내부에 장착된 PZT stack 모듈의 실제적인 사진은 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서(a)는 PZT stack과 두 개의 샷갯형 알루미늄 진동체가 억압 볼트에 의해 체결된 상태를 나타낸 것이고,(b)는 양측의 샷갯 진동체를 서로 접합시켜 수밀 처리한 후 완성한 광대역 수중 스피커의 전체적인 구조를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 10 kHz의 주파수를 중심으로 넓은 주파수 범위에 걸쳐 음향신호를 방사할 수 있는 음향 송출 시스템을 개발하기 위해 반복적인 설계 및 제작 변경을 통해 목적하는 수중 스피커를 구현하였다. 이 스피커 시스템의 제작에는 덴마크 Ferroperm Piezoceramics A/S의 PZ26의 링형 압전소자가 사용되었는데, 이 PZT 소자는 sonar의 고출력 음향변환기를 개발할 때 주로 사용되는 소자로

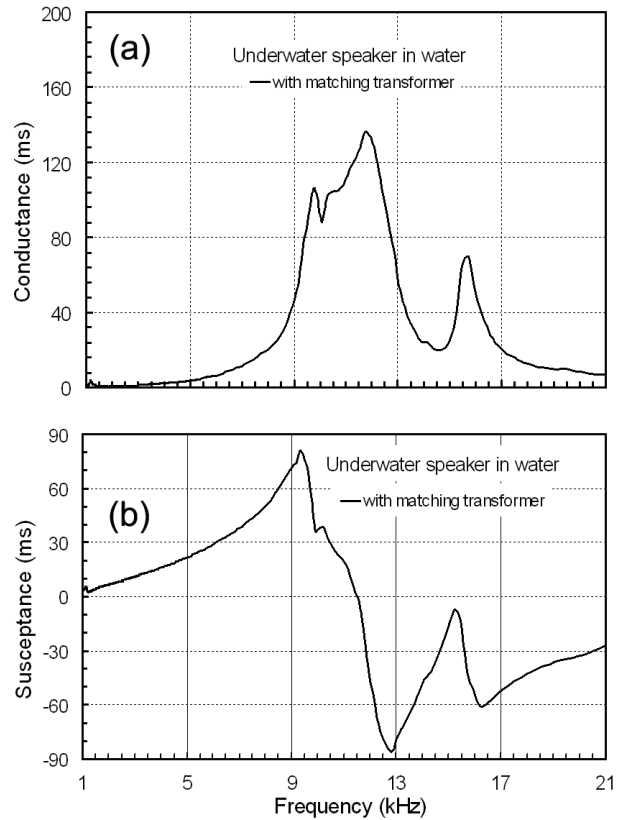


Fig. 7. Electrical conductance (a) and susceptance (b) of a developed broadband underwater speaker.

서, 그 밀도와 기계적 품질계수는 각각  $7.7 \text{ g/cm}^3$ , 약 1000 정도이다.

일반적으로 이와 같이 제작된 저주파수 대역의 수중 스피커 시스템에 대한 임피던스는 매우 큰 값을 갖기 때문에 전력 증폭기로부터 공급되는 전기적인 에너지가 음향 에너지로 변환될 때 큰 손실이 발생하여 충분한 음향 에너지를 해중으로 방출할 수 없게 된다. 이 때문에 음원장치로부터 공급되는 전기신호를 효율적으로 변환하여 최대의 음향출력을 발생시키기 위해서는 음원장치와 수중 스피커 상호간에 임피던스를 matching시킬 필요가 있다. 본 연구에서는 이 점에 주목하여 목적하는 주파수 대역에서 음향신호가 고효율로 방사될 수 있는 임피던스 matching transformer를 설계, 제작하여 Fig. 5의 스피커 본체에 내장시켜 사용하였는데, 이 스피커 시스템에 대한 전기적인 임피던스 특성은 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서는 공기중과 수중에 대한 임피던스를 함께 중첩시켜 나타내었는데, 공기중에 있어서는 각각 1.68 kHz, 9.62 kHz, 15.46 kHz에서 공진점이 나타났고, 수중에 있어서는 각각 1.16 kHz, 9.62 kHz, 15.70 kHz에서 공진점이 나타났다. Fig. 6에서 수중에 있어서는 9-13 kHz 범위에 있어 임피던스가 매우 완만하게 감소하여 그 값이 7.15-10.58 ohm의 범위에서 변화하고 있다. 현재 수중에 공급되고 있는 오디오용 전력 증폭기의 경우, 보통 8 ohm의 스피커를 기준으로 설계



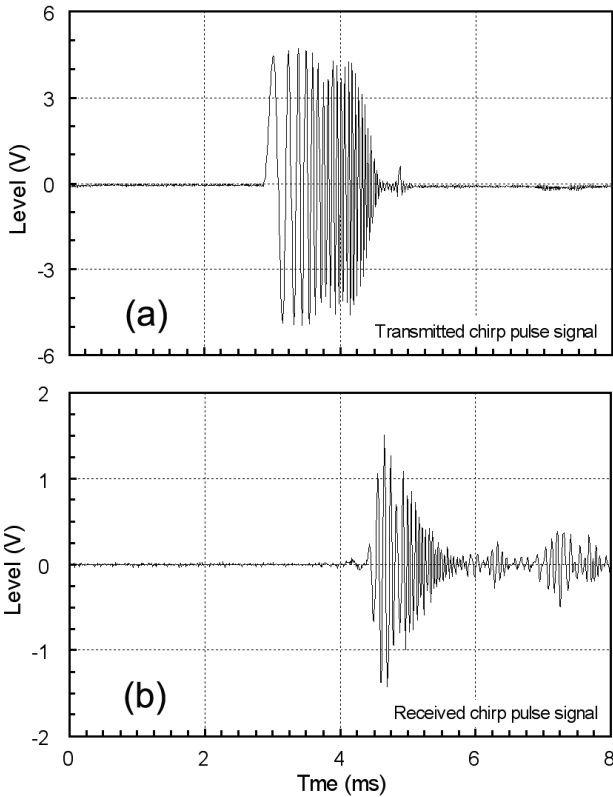


Fig. 8. Input pulse signal at electrical terminal of matching transformer connected to the broadband underwater speaker (a) and transmitting pulse signal received by B&K 8105 hydrophone.

되기 때문에 이들 상용의 audio system을 활용하면 본 연구에서 개발한 수중 스피커를 통해 해양포유류의 접근을 차단하기 위한 강력한 음향신호를 방사할 수 있음을 알 수 있었다.

수중 스피커 시스템의 어드미턴스 특성

본 연구에서 설계, 제작한 광대역 수중 스피커 시스템에 대한 수중에서의 conductance 및 susceptance를 측정할 결과는 Fig. 7 과 같다. Fig. 7에서(a)와(b)는 각각 conductance와 susceptance의 측정 결과로서, 이들 두 그림에서 종축은 conductance(ms) 및 susceptance(ms)이고, 횡축은 주파수(kHz)이다. Fig. 7에서 수중 스피커 시스템에 대한 conductance는 각각 1.18 kHz, 9.77 kHz, 11.74 kHz, 15.70 kHz의 주파수에서 peak 값을 나타내어 그 값은 각각 3.83 ms, 106.22 ms, 135.84 ms, 69.54 ms이었고, 또한, 이들 주파수에서 susceptance 값은 각각 3.62 ms, 53.60 ms, -18.08 ms, -41.27 ms를 나타내었다. 일반적으로 수중 스피커와 같은 음향 방사 시스템의 송파전압감도는 conductance, 지향성 지수, 전기음향변환효율 등에 의해 결정되는데, 그 중에서도 주파수에 따른 conductance의 변동이 송파전압감도의 주파수 특성을 결정하는 중요한 요소가 된다(Wilson, 1991). Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이 수중 스피커 시스템의 conductance는

본 연구에서 목적하는 9 -13 kHz 범위에서 강한 응답특성을 내었고, 설계 목표 주파수인 10 kHz에서의 conductance는 88.10 ms로서 매우 양호한 응답특성을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

수중 스피커 시스템의 송신 펄스응답특성

본 연구에서 설계, 제작한 수중 스피커 시스템에 대한 송신 펄스신호의 응답특성은 Fig. 8과 같다. Fig. 8의 펄스응답신호는 수중 스피커의 matching transformer의 입력단에 펄스폭 2.0 ms, 주파수 범위 1-30 kHz, 펄스반복주기 1 sec의 chirp 펄스신호를 입력하고, 음축상 약 1.5 m의 거리에서 B&K 8105 수중청음기를 이용하여 수중 스피커로부터 송출되는 직접파 신호를 수신한 결과이다.

Fig. 8에서(a)는 수중 스피커의 matching transformer의 입력단에서 측정된 송파 chirp 펄스신호이고,(b)는 수중 스피커로부터 송출되는 직접파 신호를 B&K 8105 수중 청음기를 사용하여 수신한 결과이다. Fig. 8(a)에서 수중 스피커에 chirp 펄스 신호가 입력될 때, 수중 스피커 자체의 음향진동특성에 기인하여 음향 에너지가 방사되는 주파수 영역에 있어 신호 레벨이 급격히 감소하는 현상이 나타났다. 따라서, 본 연구에서 개발된 수중 스피커 시스템이 오징어 채낚기 어장이나 가두리, 자망 및 정치성 어구가 시설된 해역에서 해양 포유류의 접근을 차단하기 위해 사용할 때, Fig. 8(b)의 광대역 chirp 펄스신호가 해중으로 방사될 것이다.

수중 스피커 시스템의 송파전압감도

본 연구에서 설계, 개발한 수중 스피커 시스템의 송파전압감도를 정량적으로 측정하기 위해 수중 스피커에 입력된 송신 chirp 펄스신호의 주파수 스펙트럼과 수중 스피커에서 송출되는 chirp 신호를 수중청음기로서 수신하고, 이 수신 chirp 펄스신호의 주파수 스펙트럼을 산출한 결과는 Fig. 9와 같다. Fig. 2의 chirp 신호발생 프로그램을 이용하여 생성한 1-30 kHz의 chirp 신호를 audiocard를 통해 전력 증폭기에 입력하고, 여기서 증폭한 chirp 펄스신호를 matching transformer를 거쳐 수중 스피커에 공급하였는데, 이 송신 chirp 펄스신호의 주파수 스펙트럼을  $E_T(f)$ , 수중 스피커에서 송출되는 chirp 펄스 신호를 음축상 1.5 m 거리에서 수중청음기를 통해 수신한 직접파 음향신호의 주파수 스펙트럼을  $E_R(f)$ 라 할 때, 수중 스피커 시스템의 송파전압감도  $TVR(\text{dB re } 1 \mu\text{Pa/V at } 1\text{m})$ 은

$$TVR(f) = 20 \log \left( \frac{E_R(f)}{E_T(f)} \right) - M_R(f) + 20 \log (R) \quad (3)$$

에 의해 산출할 수 있다(Hughes, 1998). 여기서,  $M_R(f)$ 는 수중청음기의 수파감도( $\text{dB re } 1 \text{ V}/\mu\text{Pa}$ ) 이고,  $f$ 는 주파수(kHz),  $R$ 은 측정거리(m)이다.

Fig. 9의(a)는 송신 chirp 펄스신호의 주파수 스펙트럼  $E_T(f)$ 를,(b)는 수중청음기에 의해 수신한 직접파 신호의 주파수 스펙트럼  $E_R(f)$ 을 나타낸 결과로서, 이들 두 그림에서 종축은 상대

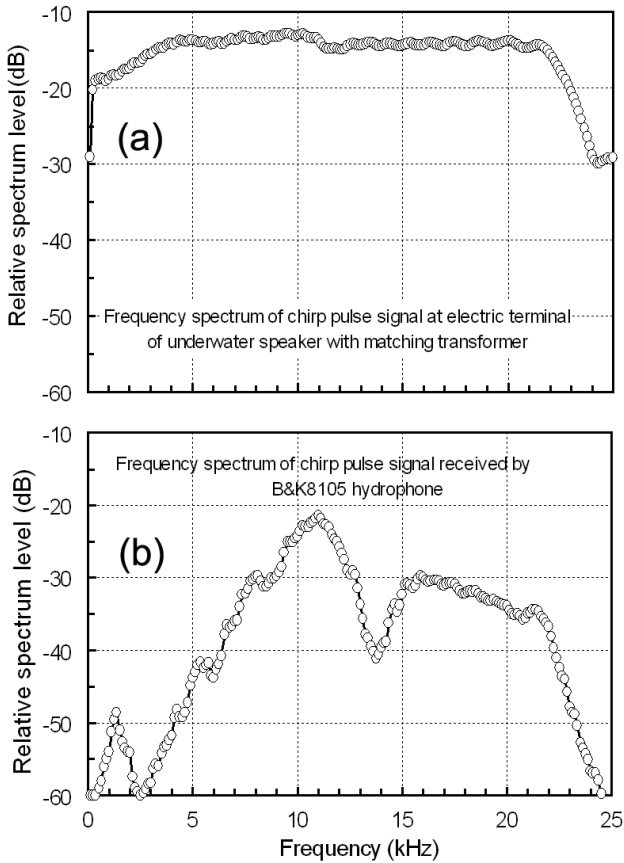


Fig. 9. Measured frequency spectrums of input chirp signal at matching transformer terminal (a) and transmitting chirp signal received by B&K 8105 hydrophone (b) for a developed broadband underwater speaker.

spectrum 레벨(dB)이고, 횡축은 주파수(kHz)이다. 또한, Fig. 9에 나타난 송신 및 수신 스펙트럼  $E_T(f)$ 와  $E_R(f)$ 를 이용하여(3) 식으로부터 수중 스피커의 송파전압감도를 산출한 결과는 Fig. 10과 같다. Fig. 10에서 종축은 수중 스피커의 송파전압감도(dB re  $1 \mu Pa/V$  at 1m)이고, 횡축은 주파수(kHz)이다. Fig. 9(a)에서 수중 스피커에 입력된 chirp 신호의 스펙트럼 레벨은 1-4 kHz의 주파수 범위에서 완만하게 증가하는 특성을, 또한, 4-22 kHz의 주파수 범위에서는 매우 평탄한 응답특성을 나타내고 있는데, 그 중에서도 10 kHz 전후의 주파수 범위에서는 약간의 불규칙한 변동을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 현상은 수중 스피커 자체의 고유 진동특성에 의해 전기적인 에너지가 음향 에너지로 변환되는 과정에서 초래되는 신호의 변동이다. 이 때문에, 수중 스피커에서는 이 스펙트럼 레벨이 변동하는 주파수 구간에서 강한 공진특성이 나타나게 된다. 또한, Fig. 9(b)의 수신 스펙트럼의 특성은 Fig. 7(a)의 matching transformer를 내장하고 있는 수중 스피커 시스템의 conductance의 주파수 의존성과 매우 유사한 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

한편, Fig. 10에서 알 수 있는 바와 같이 가장 강력한 음향 신호를 방성할 수 있는 주파수는 11.16 kHz이었고, 이 주파수

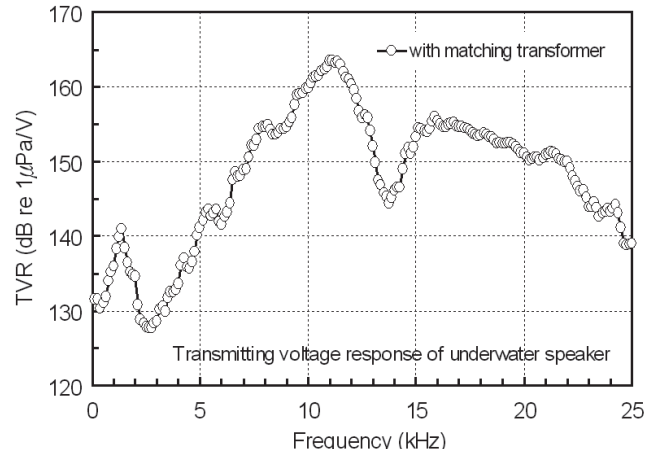


Fig. 10. Transmitting voltage response (TVR) of a developed broadband underwater speaker.

에 대한 송파전압감도는 163.45 dB이었다. 이 주파수를 정점으로 하여 송파전압감도는 점차 감소하는 경향을 나타내어 13.75 kHz에서 144.43 dB까지 떨어졌다가 다시 증가하여 15.88 kHz에서 155.95 dB로서 제 2의 peak를 나타낸 후 다시 감소하는 주파수특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 6의 수중에 대한 임피던스 특성에서 첫 번째로 임피던스가 떨어졌던 1.16 kHz 부근에서의 송파전압감도는 141.05 dB로서 10 kHz 부근의 주파수 대역에 비해 매우 낮은 송신응답특성을 나타내었다. 따라서, 이와 같은 송파전압감도의 주파수 의존성을 종합적으로 살펴보면, 140 dB의 송파전압감도를 기준으로 했을 때, 본 연구에서 개발한 수중 스피커의 사용 주파수 범위는 약 5-25 kHz이고, 이들 주파수 범위의 약 20 kHz의 대역에 걸쳐 해양 포유동물의 퇴치를 위한 음향신호를 방성할 수 있음을 알 수 있었다. 특히 본 연구에서는 돌고래나 기각류가 어구, 양식장, 어군 등에 접근하여 어구를 손상시키거나 어획물을 탈취하는 것을 미연에 방지하기 위한 음향방성장치의 개발에 초점을 두었다. 현재, 미국과 EU 등에서는 돌고래가 지닌 청각기능을 효과적으로 자극하기 위한 목적으로 주로 10 kHz를 중심 주파수로 하는 여러 핑거 시스템들이 개발되어 보급되고 있는 점에 주목할 때, 본 연구에서 개발한 광대역 수중 스피커 시스템은 특히, 연근해 어장에서 해양 포유류의 혼획 및 어획물 탈취, 또한 오징어 채낚기 어장에서 돌고래의 접근으로 인한 어군의 분산 및 도피 등을 효과적으로 차단할 수 있는 수중 스피커 시스템으로 유효하게 활용될 것으로 평가된다.

수중 스피커 시스템의 지향 특성

본 연구에서 설계, 개발한 수중 스피커 시스템의 음향 방사 지향특성을 측정된 결과는 Fig. 11과 같다. Fig. 11은 Fig. 5에 나타난 수중 스피커 시스템의 한쪽 반구형 방향에 대한 지향성 패턴을 극좌표로 나타낸 것이다. Fig. 11에서 알 수 있는 바와 같이 수중 스피커의 지향성패턴은 Fig. 5의 PZT stack의 축 방향, 즉 샷갓의 봉우리 방향에 있어서는 가장 강한 음향방사특성을

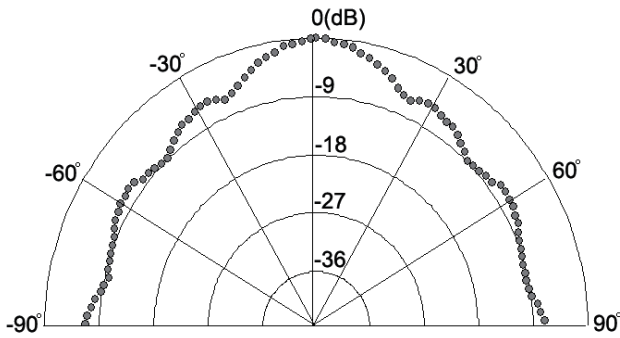


Fig. 11. Transmitting beam pattern of a developed broadband underwater speaker.

나타내고 있다. 그러나, 이 방향으로부터 점차 벗어남에 따라 방사 에너지가 점차 약해져  $\pm 45^\circ$  와  $\pm 78^\circ$  방향에서는 음축상의 0 dB과 비교하여 약 -9 dB까지 방사레벨이 저하하고 있으나, 전체적인 지향성 패턴을 볼 때, 거의 무지향성으로 음향신호가 방사되고 있음을 알 수 있었다. 따라서, 오징어 채낚기 어선이나 가두리 및 정치성 어구 주변에 설치하여 음향신호를 방성할 때, 스피커 주변의 모든 방향으로 비교적 균일하게 목적하는 음향신호를 방출할 수 있어 어업에 피해를 초래하는 해양 포유류의 접근을 차단하거나 퇴치하는데 유효하게 활용 될 수 있을 것으로 사료된다.

## 사 사

이 논문은 2010년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임(PK-2010-112).

## 참고문헌

Barlow J and Cameron GA. 2003. Field experiments show that acoustic pingers reduce marine mammal bycatch in the California drift gillnet fishery. *Marine Mammal Science* 19, 265-283.

Gearin PJ, Gosho ME, Laake JL, Cooke L, DeLong RL and Hughes KM. 2000. Experimental testing of acoustic alarms (pingers) to reduce by-catch of harbour porpoise, *Phocoena phocoena* in the state of Washington. *Journal of Cetacean Research and Management* 2, 1-10.

Gordon J and Northridge S. 2002. Potential impacts of acoustic deterrent devices on Scottish marine wildlife. Scottish Natural Heritage Commissioned Report F01AA404, 1-63.

Hughes, WJ. 1998. Transducer, underwater acoustic. *Encyclopedia of applied physics* 22, 67-84.

Lee, YW, Shin HI, Kim SJ, Seo DO, Lee DJ, Kim ZG and Hwang DJ. 2005. Trial manufacture of dual frequency acoustic finger to minimize cetacean bycatch. *J Kor Soc Fish Tech* 41, 207-212.

Richard F. 2005. Effectiveness of acoustic deterrent devices (pingers). *Centrum voor Milieuwetenschappen Leiden (CML) report*, 1-33.

Svilainis L and Dumbrava V. 2007. Evaluation of the ultrasonic transducer electrical matching performance. *Ultragarsas* 62, 16-21.

Svilainis L and Dumbrava V. 2006. The RF transformer for ultrasound excitation : the initial study. *Ultragarsas Journal* 58, 25-29.

Whitlock B. 2006. Audio transformers. *Jensen Transformers Inc, California, U.S.A.*, 3-14.

Wilson, OB, 1991. *Introduction to Theory and Design of Sonar Transducers*. Peninsula Publishing, California, U.S.A., 11-108.

2011년 6월 5일 접수  
 2011년 7월 12일 수정  
 2011년 10월 5일 수리