

# 광대역 듀얼빔(Dual-beam) 어군탐지기의 성능 특성

박치완<sup>1</sup> · 이대재<sup>2</sup> · 박근창<sup>2</sup> · 이경훈<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>국립부경대학교 해양생산관리학부 수산물리학전공, <sup>2</sup>국립부경대학교 해양생산시스템관리학부

## Performance Characteristics of a Broadband Dual-beam Echo Sounder

Chiwan Park<sup>1</sup>, Dae-Jae Lee<sup>2</sup>, Geunchang Park<sup>2</sup> and Kyounghoon Lee<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Division of Marine Production Management, Major of Fisheries Physics, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

<sup>2</sup>Division of Marine Production System Management, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

The performance characteristics of a broadband dual-beam echo sounder operating over the frequency range of 110–200 kHz were investigated. The system sensitivities of the broadband dual-beam echo sounder were estimated for the narrow- and wide-beam channels using a 22 mm tungsten carbide sphere (WC22). Echo signals from the WC22 sphere generated by a chirp pulse transmitted from the narrow-beam transducer were simultaneously received by the narrow- and wide-beam channels. The frequency-dependent beam-pattern factor was removed from the narrow-beam output using the estimated system sensitivities of the two channels. The validity of the broadband dual-beam echo sounder was evaluated using a 38 mm tungsten carbide sphere (WC38), and difference between the simulated (–39.33 dB) and measured (–40.19 dB) TS values of the WC38 sphere was 0.86 dB. These results, indicate that the chirp data acquisition and processing system developed in this study provides sufficiently reliable target strength estimation accuracy when used as a broadband dual-beam echo sounder system, compared with that of a conventional split-beam echosounder.

**Keywords:** Broadband dual-beam echo sounder, Tungsten carbide sphere, Chirp pulse signal, Acoustical calibration, System validity

## 서 론

최근, 어선에 보급되고 있는 광대역 어군탐지기(chirp echo sounder)의 대부분은 단일 빔(single beam) 방식의 어군탐지기이다(Airmar Technology Corporation, 2013). 이들 광대역 어군탐지기를 활용하면, 넓은 주파수 대역에 대한 어족생물의 어종 의존적인 음향(echo) 신호를 계속할 수 있을 뿐만 아니라, 탐지생물의 식별분해능 등이 향상되어 어업생산활동에 필요한 종 식별 정보를 얻을 수 있다(Lee, 2015; Lee et al., 2016; Kang et al., 2022). 그러나, 광대역 어군탐지기는 탐지 어류의 체장조성과 같은 선택적 어업을 수행하는데 필요한 생물학적 정보는 제공되지 않아 그 성능특성에 한계가 있다. 이와 반대로 split beam 방식의 어군탐지기는 4개의 진동자 블록으로 이루어진 음향변환기를 사용하며(Lee and Shin, 2001; Lee and Lee,

2011; Lee, 2021), 4개의 진동자 블록에서 발생하는 음향신호는 서로 독립적으로 발생되어 해양생물의 음향신호를 각각 받아들인다(Lee, 2021). 즉, 해양생물로부터 수신되는 각각의 음향신호를 이용하면 해양생물의 도래방향(direction of arrival)을 추정할 수 있으며(Levanon, 1988; Burdic, 1991; Mahafza, 1998), 이와 함께 지향성을 보정한다면 해양생물의 반사강도를 측정할 수 있다. 따라서, Split beam 방식의 어군탐지기의 이러한 성능을 활용하면 해양생물의 반사강도를 측정할 수 있으며, 해양생물의 반사강도는 체장 의존성으로부터 어군에 대한 체장조성을 추정할 수 있다(Lee, 2021). 음향을 이용하여 종을 식별하는 방법에는 어군의 에코 신호 특성에 의한 방법(Simmonds et al., 1996; Park et al., 2015), 에코그램 상에 나타난 형태를 판별하는 DFA (discriminant function analysis) 방법(Tsagarakis et al., 2015; Lee et al., 2015), 어군의 주파수 특성 차이를 이용

\*Corresponding author: Tel: +82. 51. 629. 5889 Fax: +82. 51. 629. 5889

E-mail address: klee71@pkn.ac.kr



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2026.0229>

Korean J Fish Aquat Sci 59(3), 229-240, June 2026

Received 31 March 2026; Revised 9 April 2026; Accepted 25 April 2026

저자 직위: 박치완(대학원생), 이대재(명예 교수), 박근창(연구원), 이경훈(교수)

한 방법 등이 있다(Woillez et al., 2012; Lee et al., 2015). 이 중 어군의 주파수 특성 차이를 이용한 주파수차별(dB difference method)은 두 주파수 이상의 주파수를 이용한 방법으로 대상 어류의 주파수 특성 차이를 이용하여 생물의 종을 식별하는 방법이다(Kang et al., 2002; Woillez et al., 2012; Lee et al., 2015; Choi et al., 2018). 기존에는 38과 120 kHz 두 주파수를 이용하여 대상 어종을 식별하였지만, 최근에는 광대역 주파수를 이용하여 종을 더 세세하게 분석하는 연구 등이 진행되고 있다(Park et al., 2025).

기존 split beam 방식의 어군탐지기가 제공하는 체장 추정 등의 기능을 저가의 광대역 어군탐지기에 적용할 수 있다면, 어로 현장에서 어업자는 이들 광대역 어군탐지기를 사용하여 어종식별정보, 고분해능의 echogram 정보, 체장조성정보 등을 동시에 취득할 수 있게 될 것이다(Lee, 2016, 2018, 2021). 본 연구에서는 이와 같은 점에 주목하여 어로현장에서 체장정보의 수집이 가능한 광대역 어군탐지기를 개발하기 위한 연구의 일환으로 dual-beam 방식의 체장추정기술을 도입한 광대역 dual-beam 어군탐지기를 설계, 개발하였다. 또한, 이 광대역 dual-beam 어군탐지기에 대한 음향학적 교정을 수행한 후, 실험수조에서 그 성능특성의 평가를 위한 검증실험을 수행하였다.

## 재료 및 방법

### 광대역 dual-beam 어군탐지기의 시스템 구성

본 연구에서는 Lee (2018)가 개발한 chirp 데이터 수록 및 처리 시스템을 바탕으로 어류의 음향반사강도를 정량적으로 추정하기 위한 광대역 dual-beam 어군탐지기를 설계, 개발하였는데, 그 시스템의 구성은 Fig. 1 및 Fig. 2와 같다. Fig. 1에서 chirp echo 데이터 수록 및 처리 시스템은 송신모듈 1 채널(narrow beam)과 수신 모듈 2채널(narrow beam, wide beam)이 서로 독립적으로 구동되도록 설계된 시스템이다. 따라서, 송신모듈은 Fig. 2에서와 같이 광대역 narrow beam (좁은 빔) 음향변환기에 접속하여 독립적으로 구동하고, 수신모듈은 각각 광대역 narrow beam 채널과 광대역 wide beam (넓은 빔) 채널의 음향변환기에 접속하여 동시에 수중물표의 echo 신호를 수신함으로써, chirp 데이터 수록 및 처리 시스템은 광대역 dual-beam 어군탐지기로서의 역할을 수행하게 된다.

먼저, dual-beam chirp 펄스 신호의 송신은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 FPGA (field-programmable gate array) 모듈(Digilent, 2011; Gądek et al., 2014)로부터 발생시킨 송신 펄스 신호를 chirp transmitting 모듈을 경유하여 전력증폭, 펄스 폭 및 펄스 반복주파수 등을 조정하여 대형음향수조( $L \times B \times D$ ,  $5 \times 6 \times 5$  m)의 한쪽 벽면에 설치된 narrow beam 채널의 송파기(B265LH-N; Airmar Technology Corp., Milford, NH, USA)에 전송하여 수중으로 발사되었다. 이 때, 송신펄스신호는 노트북 PC의 USB 인터페이스를 통해 FPGA 모듈에 의해

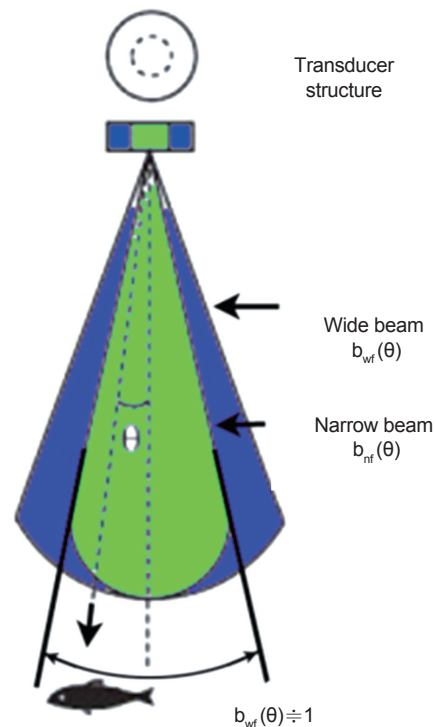


Fig. 1. Schematic diagram of wide- and narrow-beam patterns for a broadband dual-beam echo sounder that is transmitting linear frequency-modulated (LFM) signals spanning the frequency range 110–200 kHz in order to obtain the information for species-specific and frequency-dependent target strength on resolved fish targets within the sound beam.

제어되는데, 본 실험에서는 chirp 펄스신호의 폭(pulse width)을 1.0 ms, 주파수 범위를 100–220 kHz로 설정한 후, narrow beam 채널의 송파기를 통해 수중으로 송출되었다.

한편, dual-beam chirp echo 신호의 수신은 Fig. 2에서와 같이 각각 narrow beam 수파기(B265LH-N)와 wide beam 수파기(B175HW; Airmar Technology Corp.)에 의해 동시에 이루어 지는데, 이때, 이들 echo 신호는 narrow와 wide beam 수신부의 전치증폭기, TVG (time varied gain) 증폭기 및 대역필터 등을 거쳐 A/D 변환기에서 양자화되었다. 또한, 각 수신부에 입력되는 echo 신호의 A/D 변환은 12 bit (ADC7476; Texas Instruments, Dallas, TX, USA), 1 MHz로서 샘플링되어 하드 디스크에 실시간으로 수록되었다. 이 때, 대형음향수조의 송파기로부터 2.5 m 위치에 설치된 수중표적으로부터의 지향각 및 주파수의 의존적인 chirp echo 신호는 대역 필터와 전치증폭기 등을 경유하여 수신하고, 디지털 오실로스코프(Model DS-1530; EZ Digital, Gwangju, Korea) 및 스펙트럼 분석기(Model LSA-30; LIG Nex1, Yongin, Korea)를 사용하여 echo 신호의 변동특성을 관찰하면서 하드 디스크에 수록되었다. 이렇게 수록한 chirp

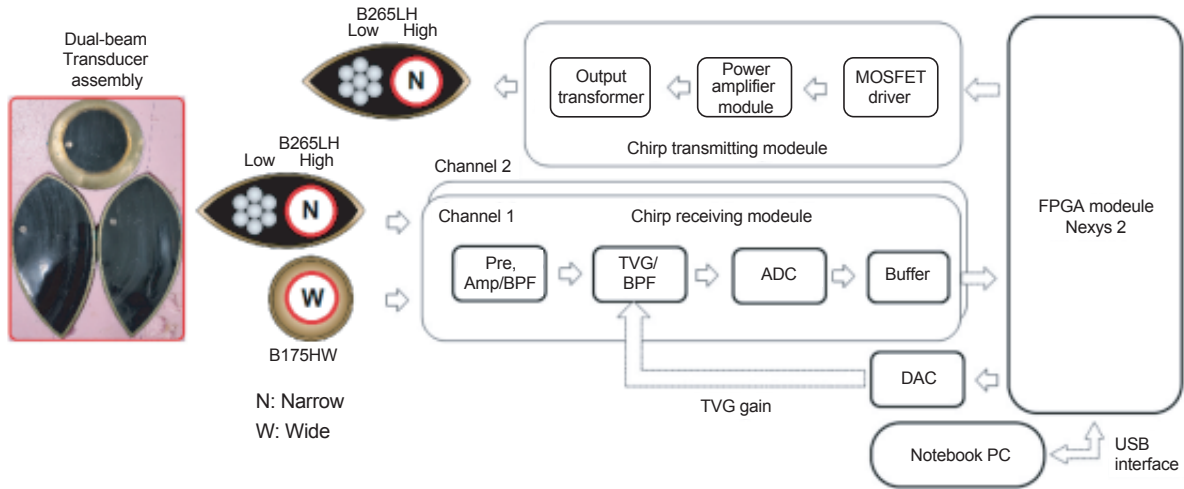


Fig. 2. Schematic diagram of the broadband dual-beam echo sounder developed in this study. The system consist of an FPGA (field-programmable gate array) module, a transmitter module, two receiver modules and an chirp signal generator implemented on a PC. The transmitter module composed of power amplifier, transformer and a narrow-beam transducer. The receiver module composed of two channel TVG (time varied gain) amplifier modules and a pairs of narrow and wide-beam transducers. The communication with FPGA hardware is managed by a USB-based protocol and associated USB interface (Lee, 2018).

echo 데이터는 후일 실험 목적에 따라 정량적인 분석이 수행되었다. 즉, 광대역 dual-beam 어군탐지기의 송신과 수신 감도측정은 chirp 음향변환기의 가용 주파수 대역인 110–200 kHz의 주파수 범위를 대상으로 직경 22 mm의 탄화 텅스텐 구(tungsten carbide sphere, 이하 WC22 교정구)를 사용하여 narrow beam 채널에 대한 송신 및 수신 감도와 wide beam 채널에 대한 수신감도를 각각 도출하였다(Lee et al., 2022). 실험에 사용한 탄화 텅스텐 구(HRT Precision Steel Ball Co., Guangdong, China)는 코발트 성분이 약 6% 정도 포함된 초경구(super hard ball)이다. 이 교정구에 대한 음향반사강도의 주파수 의존성 패턴을 수치계산하는데 이용한 재질특성, 즉, 밀도, 종방향 음

속(longitudinal sound speed), 횡방향 음속(transverse sound speed)은 각각 14,890 kg/m<sup>3</sup>, 6,845 m/s, 4,132 m/s이었다. 실험 당시 실험수조의 수온은 20.2°C이었고, 또한, WC 교정구의 수치계산은 선행연구(Simmonds and MacLennan, 2005)를 참고하여 밀도와 음속을 각각 1,025 kg/m<sup>3</sup>, 1,495 m/s로 설정하여 수행하였다. Fig. 1 및 Fig. 2에서 알 수 있는 바와 같이 광대역 dual-beam 어군탐지기를 설계, 개발하는 데에는 1개의 송신 채널과 2개의 수신 채널이 필요하고, 또한, 이들 채널에 접속될 송신용의 narrow beam 음향변환기와 수신용의 narrow beam과 wide beam 음향변환기가 각각 별도로 필요하다. 본 연구에서는 Airmar 사의 chirp 음향변환기를 사용하여 광대역

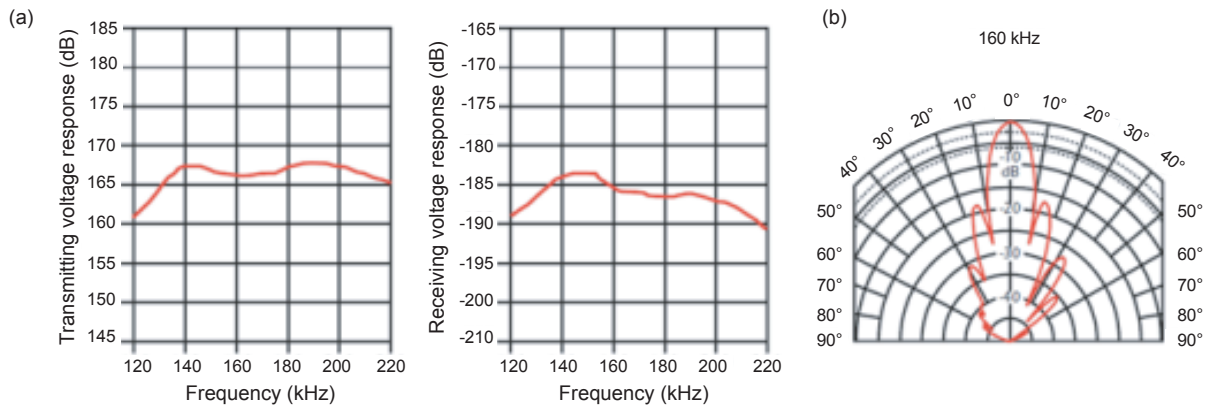


Fig. 3. Measured transmitting voltage response, receiving voltage response (a) and directivity patterns (b) as a function of frequency for narrow-beam transducer (Airmar Technology Cooperation, 2015a) used in a broadband dual-beam echo sounder.

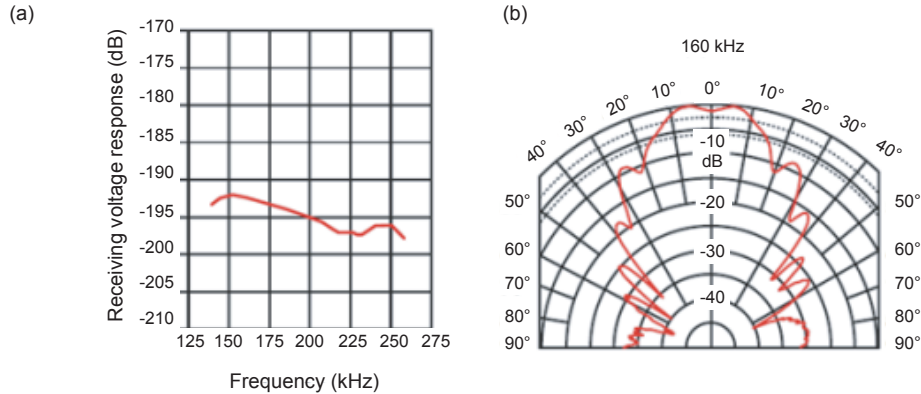


Fig. 4. Measured transmitting voltage response and beam patterns as a function of frequency for wide-beam transducer (Airmar Technology Cooperation, 2015b) used in a chirp dual-beam echo sounder.

dual-beam 어군탐지기를 설계하였는데, 여기서 사용한 narrow beam과 wide beam 음향변환기의 송파감도(transmitting voltage response)와 수파감도(receiving voltage response)는 각각 Fig. 3 및 Fig. 4와 같다. 이들 음향변환기의 공통적인 사용가능 주파수 대역은 Fig. 3과 Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 약 100–220 kHz 정도이지만, 본 연구에서는 110–200 kHz 대역을 대상으로 연구를 수행하였다. 또한, 송수신 채널에 접속된 narrow beam과 wide beam 음향변환기의 -3 dB 지향각은 각각 약 8°와 약 24°이었다. 따라서, narrow beam 음향변환기의 지향각 범위에 대한 wide beam 음향변환기의 지향성 함수의 변동은 무시할 수 있다고 판단된다.

#### 광대역 dual-beam 어군탐지기의 음향학적 교정

광대역 dual-beam 방식에서는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 narrow beam과 wide beam을 동시에 이용하는 데, 음향펄스 신호의 송신은 지향각이 좁은 narrow beam  $b_{Nr}(\theta)$ 를 이용하여 행하고, echo 신호의 수신은 지향각이 좁은 narrow beam과 넓은 wide beam  $b_{w}(\theta)$ 을 모두 이용하여 동시에 행한다. 이 때, 반사강도의 주파수 의존성이  $T_s(f)$ 인 어류가 음축으로부터 방향각  $\theta$  만큼 벗어난 위치에 존재하는 경우, Fig. 1의 narrow beam과 wide beam으로부터 수신되는 어체의 주파수 의존적인 echo 신호의 진폭을 각각  $E_N(f)$ ,  $E_w(f)$ 라 하면,

$$E_w(f) = Z_w(f) \cdot b_{Nr}(\theta) \cdot b_{w}(\theta) \cdot T_s(f) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$E_N(f) = Z_N(f) \cdot b_{Nr}^2(\theta) \cdot T_s(f) \quad \dots\dots\dots (2)$$

이 된다(Traynor and Ehrenberg, 1979). 여기서,  $Z_N(f)$ 는 narrow beam에 대한 송신과 수신 경로에 대한 주파수 의존적인 시스템 상수이고,  $Z_w(f)$ 는 narrow beam 송신과 wide beam 수신 경로에 대한 주파수 의존적인 시스템 상수이다. 이때, narrow 및 wide beam으로부터 출력되는 어류로부터의 echo 신호는 이

들 두 beam에 대한 지향성 패턴의 차이에 기인하여 서로 다른 진폭특성을 나타낸다. 만일, Fig. 1에서와 같이 narrow beam의 지향각 범위내에서 wide beam의 지향성 함수의 값이 1에 근사할 때, 즉,  $b_{Nr}(\theta) \approx 1$ 을 만족할 때,  $E_N(f)$ ,  $E_w(f)$ 는

$$E_w^2(f) = Z_w(f) \cdot b_{Nr}(\theta) \cdot T_s(f) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$b_{Nr}(\theta) = \frac{E_w^2(f)}{Z_w(f) \cdot T_s(f)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$E_N^2(f) = Z_N(f) \cdot \left( \frac{E_w^2(f)}{Z_w(f) \cdot T_s(f)} \right) \cdot T_s(f) \quad \dots\dots\dots (5)$$

이 된다. 따라서, narrow beam 내에서 탐지된 어류의 주파수 의존적인 반사강도  $T_s(f)$ 는

$$T_s(f) = \frac{Z_N(f)}{Z_w^2(f)} \cdot \frac{E_w^4(f)}{E_N^2(f)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

에 의해 구할 수 있다. 그러나, 어로현장에서 실시간으로 수신되는  $E_N(f)$ ,  $E_w(f)$ 를 측정하여 식 (6)으로부터 어류의 반사강도를 추정하기 위해서는  $E_N(f)$ 의 송수신 시스템에 대한 주파수 의존적인 시스템 상수  $Z_N(f)$ 와  $E_w(f)$ 의 송수신 시스템에 대한 주파수 의존적인 시스템 상수  $Z_w(f)$ 를 알아야만 한다. 이를 위해 본 연구에서는 WC22 교정구를 사용하여 이들 두 송수신 모드에 대한 dual-beam 어군탐지기의 음향학적 교정을 수행하였다. 광대역 dual-beam 시스템의 음향학적 교정은 WC22 교정구를 narrow beam 방사면으로부터 음축상 약 2.5 m 위치에 설치한 후 실시하였다. 즉, 식 (7)과 식 (8)에서  $b_{Nr}(\theta) \approx 1$ ,  $b_w(\theta) \approx 1$ 의 조건을 만족하는 상황에서 시스템 교정을 실시하였다.

$$Z_w(f) = \frac{E_w^2(f)}{T_s(f) \cdot b_{Nr}(f) \cdot b_w(f)} \quad \dots\dots\dots (7)$$

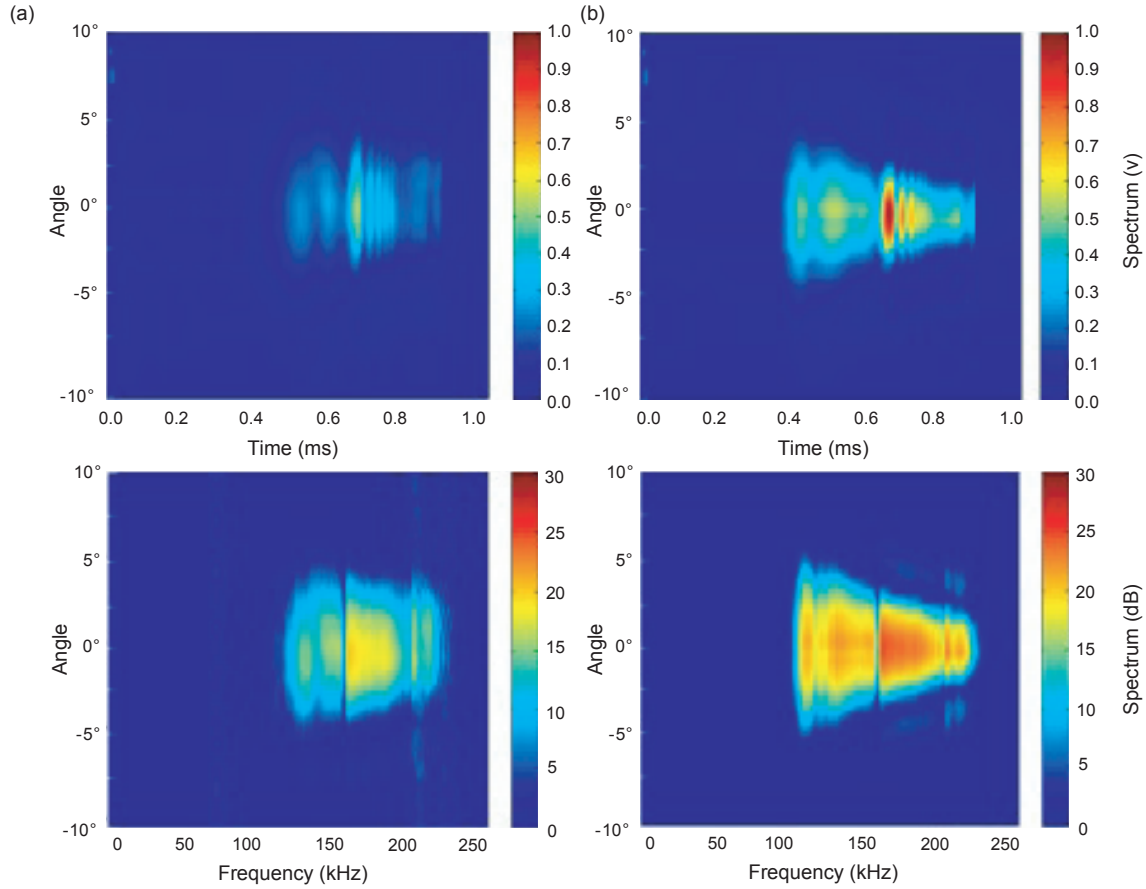


Fig. 5. Time response (upper) and frequency response images (lower) for the echo signals measured from a 22 mm tungsten carbide sphere as a function of rotation angle for the wide- (a) and narrow-beam channels (b) of the broadband dual-beam transducers. To quantitatively compare the sensitivity difference between wide and narrow-beam channels, the frequency-dependent echo response for the wide-beam channel was normalized relatively to the maximum echo amplitude on the beam axis for the narrow-beam channel.

$$Z_N(f) = \frac{E_w^2(f)}{T_s(f) \cdot b_{Nr}^2(\theta)} \quad \text{..... (8)}$$

따라서, 본 연구에서 사용한 광대역 dual-beam 어군탐지기의 주파수 의존적인 시스템 상수  $Z_N(f)$ ,  $Z_w(f)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Z_w(f) = \frac{E_w^2(f)}{T_s(f)} \quad \text{..... (9)}$$

$$Z_N(f) = \frac{E_N^2(f)}{T_s(f)} \quad \text{..... (10)}$$

#### 광대역 dual-beam 어군탐지기의 검증실험

광대역 dual-beam 어군탐지기의 성능평가를 위한 검증실험은 WC22 교정구를 사용하여 추정된 narrow beam 채널에 대한

수신 감도 [ $Z_N(f)$ ]와 wide beam 채널에 대한 수신감도 [ $Z_w(f)$ ] 데이터를 바탕으로 수행되었다. 즉, 직경 38 mm 탄화 텅스텐 구(이하 WC38 검증표적이라 함.)의 반사강도 [ $T_s(f)$ ]를 대형 실험수조(L×B×D, 5×6×5 m)에서 측정 후, 이 결과를 수치 계산에 의한 이론반사강도(Lee et al., 2022)와 서로 비교, 분석함으로써 광대역 dual-beam 어군탐지기의 성능특성을 검증하였다.

#### 결 과

##### 광대역 dual-beam 어군탐지기의 시스템 감도 추정

본 연구의 광대역 dual-beam 어군탐지기는 Lee (2018)가 개발한 chirp 데이터 수록 및 처리 시스템을 바탕으로 설계되었기 때문에 Fig. 1 및 Fig. 2에서와 같이 송신모듈로부터 출력되는 광대역 펄스신호는 narrow beam 음향변환기(B265H-N)를 통해 송출되고, 또한, 어족생물로부터의 echo 신호는 2 채널

널의 수신모듈에 독립적으로 접속된 narrow beam 음향변환기(B265H-N)와 wide beam 음향변환기(B175HW-W)를 통해 각각 수신된다. 이때, dual-beam 어군탐지기에 대한 반사강도의 추정이론, 즉, 식 (6)을 바탕으로 어로현장에서 실시간적으로 탐지되는 어족생물의 음향반사강도를 추정하기 위해서는 먼저, narrow beam 채널과 wide beam 채널을 통해 각각 수신되는 echo 신호  $E_N(f)$ ,  $E_W(f)$ 로부터 이들 송·수신 경로에 대한 시스템 상수의 주파수 의존성, 즉, 감도함수  $Z_N(f)$ ,  $Z_W(f)$ 를 도출하여야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 WC22 교정구를 사용하여 광대역 dual-beam 어군탐지기의 narrow beam 채널과 wide beam 채널에 대한 시간과 주파수 응답의 지향각 의존성 패턴을

각각 구하였는데, 그 결과는 Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7과 같다.

Fig. 5a와 Fig. 5b는 Fig. 1 및 Fig. 2의 광대역 어군탐지기의 송신용 narrow beam 음향변환기(송파기)의 음축(beam axis)과 수직인 방향으로 WC22 교정구를 beam 외측로부터 내측으로 이동시키면서 각각 수신용 wide beam 음향변환기(Fig. 5a)와 narrow beam 음향변환기(Fig. 5b)를 통해 수신한 echo 신호의 시간과 주파수 응답의 지향각 의존성 패턴을 나타낸 것이다. Fig. 5a와 Fig. 5b에서 각각 위쪽은 시간응답의 지향각 의존성 패턴이고, 아래쪽은 주파수 응답의 지향각 의존성 패턴이다. 또한, 광대역 어군탐지기의 wide beam 채널과 narrow beam 채널에 대한 WC22 교정구의 시간-주파수 응답특성과 주파수 스펙

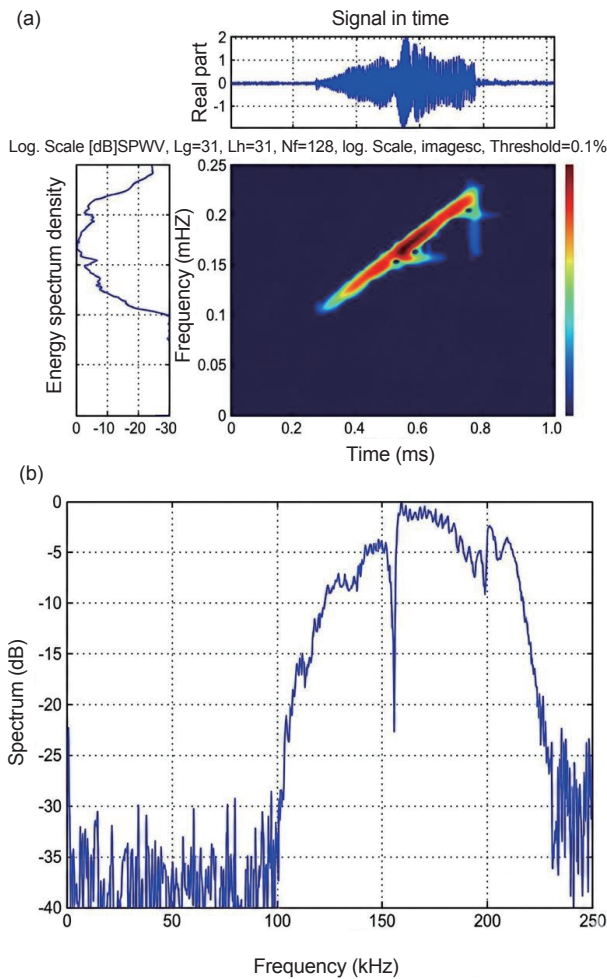


Fig. 6. The echo signal measured from a 22 mm tungsten carbide sphere located on the sound beam axis for the wide-beam channel. a, Time-frequency response characteristic; b, Frequency spectrum. A deep null in the frequency spectrum occurs at the frequency corresponding to the null position for the theoretical target strength of a 22 mm tungsten carbide sphere.

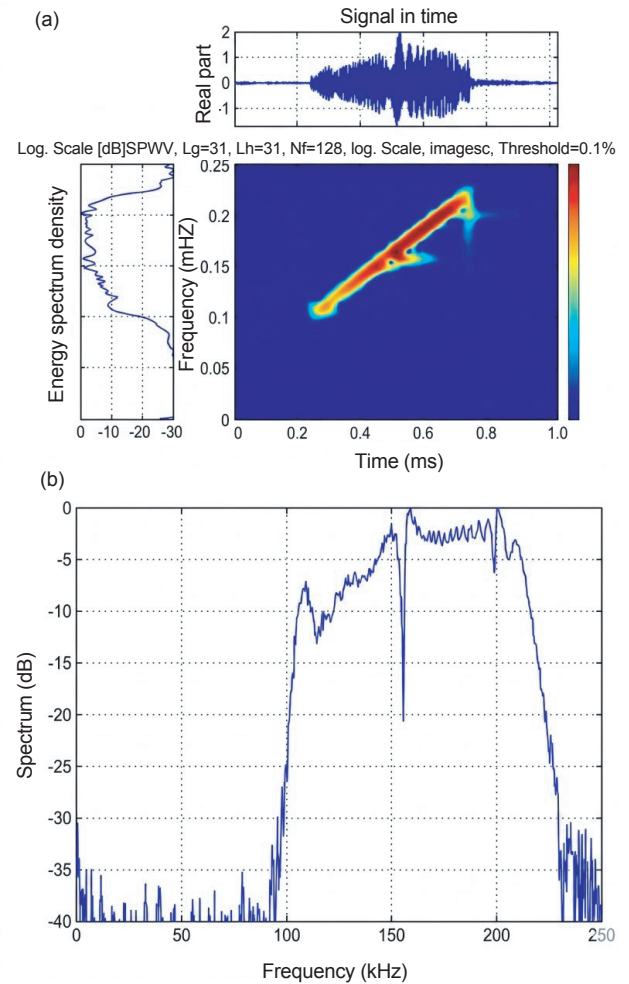


Fig. 7. Time-frequency response characteristic (upper) and frequency spectrum (lower) of the echo signal measured from a 22 mm tungsten carbide sphere located on the sound beam axis for the narrow-beam channel. A deep null in the frequency spectrum occurs at the frequency corresponding to the null position for the theoretical target strength of a 22 mm tungsten carbide sphere.

트럼 패턴을 나타낸 결과는 각각 Fig. 6 및 Fig. 7과 같다.

먼저, Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7에서 narrow beam 음향변환기(B265H-N)를 통해 송출된 chirp 펄스신호가 WC22 교정구로부터 산란되어 wide beam 채널과 narrow beam 채널에 각각 수신될 때, 이들 2개의 채널에 대한 수신감도의 차이로 인해 Fig. 5a와 Fig. 5b에서 알 수 있는 바와 같이 시간 및 주파수 echo 응답의 지향각 의존성이 서로 다른 패턴을 나타내었다. 또한, wide beam과 narrow beam 간의 echo 응답 차이는 단순한 수신 감도 차이에 의한 결과뿐만 아니라, 음향변환기의 지향성 패턴과 주파수 의존성에 의해 결정되는 물리적 특성에 기인한다. 즉, wide beam의 경우 비교적 넓고 일정한 지향각(constant beam pattern)을 유지하기 때문에, 측정 주파수 대역 내에서 입사각 변화에 따른 echo 진폭의 변동이 상대적으로 작게 나타난다. 반면, narrow beam의 경우 주파수 증가에 따라 지향각이 감소하는 특성을 가지므로, 동일한 산란체에 대해서도 입사각 및 주파수에 따라 echo 응답이 민감하게 변화하게 된다. 이러한 특성은 결과적으로 두 채널 간 echo 응답의 차이를 유발하며, narrow beam에서는 지향성 함수와 주파수 의존적 빔 패턴의 변화가 echo 신호의 진폭 및 스펙트럼 형태에 직접적인 영향을 미친다. 특히, Fig. 5의 echo 신호에 대한 주파수 응답특성을 서로 비교해 볼 때, wide beam 채널에 있어서는 측정 주파수 대역 110~200 kHz 범위에서 수신 음향변환기(B175HW-W)의 지향각이 25°로서 일정(constant beam)하여 echo 응답이 지향각의 변화에 거의 영향을 받지 않는 특성을 나타내었다. 그러나, narrow beam 채널에서는 주파수의 증가에 따라 지향각이 10°에서 6°까지 감소하는 영향으로 인해 echo 신호의 지향성 의존성이 매우 급격하게 변동하는 특성을 나타내었다. 즉, narrow beam 음향변환기(B265H-N)의 사용 주파수 대역 110~200 kHz에 대한 평균 지향각 8°(±4°) 범위에 대한 wide beam 음향변환기(B175HW-W)의 시간 및 주파수 응답은 거의 일정한 패턴을 나타내고 있어 이 지향각 범위내의 어족생물에 대한 echo 응답을 추출할 때, (1)식의 wide beam 음향변환기에 대한 지향성 함수  $b_{wf}(\theta)$ 는 근사적으로  $b_{wf}(\theta) \approx 1$ 이 됨을 알 수 있었다. 따라서, 본 연구에서 설계한 광대역 dual-beam 어군탐지기는 식 (6)으로 정의되는 어류 반사강도의 이론적인 추정식을 만족하는 시스템으로 평가된다.

한편, Fig. 6와 Fig. 7의 음축상에 위치한 WC22 교정구로부터 측정된 wide beam 채널과 narrow beam 채널에 대한 echo 신호의 시간-주파수 응답특성을 서로 비교해 볼 때, Fig. 6의 wide beam 채널에 대한 응답 레벨은 100 kHz에서부터 150 kHz까지의 구간에서 급격한 응답진폭의 변동 없이 -35 dB로부터 -5 dB까지 점진적으로 증가하는 현상을 나타내었다. 그 후, 156.74 kHz에서는 공진산란현상이 발생하여 매우 급격한 응답레벨의 저하현상, 즉, deep null 현상이 출현하였고, 그 공진산란 이후에는 다시 회복된 응답특성이 200 kHz까지 서서히 감소하는 응답패턴을 나타내었다. 이에 반해, Fig. 7의 narrow beam 채널

에 있어서는 100 kHz에서부터 110 kHz까지의 좁은 주파수 대역에서 응답레벨이 -30 dB로부터 -7.5 dB까지 급격히 증가한 후, 115.7 kHz에서는 공진산란으로 인한 null 현상이 발생하여 echo 진폭이 일시적으로 감소하였다. 그 후, echo 진폭은 점진적으로 회복하는 경향을 나타내었지만, wide beam 채널에서와 같이 156.74 kHz에서 다시 강한 공진산란현상으로 인해 deep null 현상이 출현하였고, 그 공진산란 이후의 200 kHz까지 대역에서는 거의 일정한 응답패턴을 나타내었다.

광대역 dual-beam 어군탐지기의 wide beam 채널과 narrow beam 채널의 송·수신 경로에 대한 시스템 상수의 주파수 의존성 패턴을 추정된 결과는 각각 Fig. 8 및 Fig. 9와 같다. Fig. 8과 Fig. 9에서 종축의 좌측 scale은 각각 (9)식과 (10)식으로 정의되는 wide beam 채널과 narrow beam 채널의 시스템 상수  $Z_N(f)$ 와  $Z_W(f)$ 의 주파수 스펙트럼(dB)이고, 우측 scale은 WC22 교정구에 대한 음향반사강도의 수치계산 스펙트럼(dB)이다.

즉, Fig. 8에서 점선은 wide beam 채널로부터 측정된 WC22 교정구의 echo 응답 패턴  $E_W(f)$ 과 이론반사강도 스펙트럼  $T_s(f)$ 에 의해 구한 결과이고, Fig. 9에서 점선은 narrow beam 채널로부터 측정된 WC22 교정구의 echo 응답 패턴  $E_N(f)$ 과 이론반사강도 스펙트럼  $T_s(f)$ 에 의해 구한 결과이다. Fig. 8과 Fig. 9에서 WC22 교정구의 시뮬레이션 반사강도의 주파수 의존성 패턴에서는 157.23 kHz에서 매우 강한 deep null 응답, 즉, 경면 반사파, 원주 산란파 및 내부파 성분 사이에 강한 상쇄간섭이 발생하여 음향반사강도가 -58.03 dB까지 급격하게 저하하는 현상이 나타났다. 그러나, 이 공진산란 주파수로부터 벗어난 주파수 영역에서는 echo 생성에 기여하는 응답성분들이 random 위상으로 간섭하기 때문에 원주 산란파와 내부 반사파 성분이 서로 상쇄간섭을 일으켜 거의 소멸되고, 경면 반사파만이 echo 응답성분으로 출현하는 현상을 나타내었다. 이와 같은 echo 응답특성은 wide beam 채널과 narrow beam 채널의 송·수신 경로에 대한 시스템 상수의 주파수 의존성 패턴에서도 동일하게 추출되었다. 즉, wide beam 채널과 narrow beam 채널로 입력되는 echo 응답신호는 각 채널에 대한 수신감도의 차이로 인해 Fig. 8과 Fig. 9의 점선과 같이 서로 다른 주파수 의존성 패턴으로 나타나고 있지만, 공진산란 주파수 156.74 kHz는 시뮬레이션 반사강도의 주파수 의존성에 출현한 공진주파수 157.23 kHz와 거의 일치하는 결과를 나타내었다. 특히, 본 연구에서 설계한 광대역 dual-beam 어군탐지기의 경우, Fig. 9의 narrow beam 채널에 대한 echo 신호의 측정응답특성은 시뮬레이션 반사강도의 주파수 의존성패턴과 거의 같은 유형의 변화를 나타내었지만, Fig. 8의 wide beam 채널에 대한 echo 신호의 측정응답특성은 공진산란 주파수 156.74 kHz로부터 벗어날수록 응답신호레벨이 점차 저하하는 현상이 뚜렷하게 나타났다.

#### 광대역 dual-beam 어군탐지기의 성능특성 평가

본 연구에서 설계, 개발한 광대역 dual-beam 어군탐지기의 검

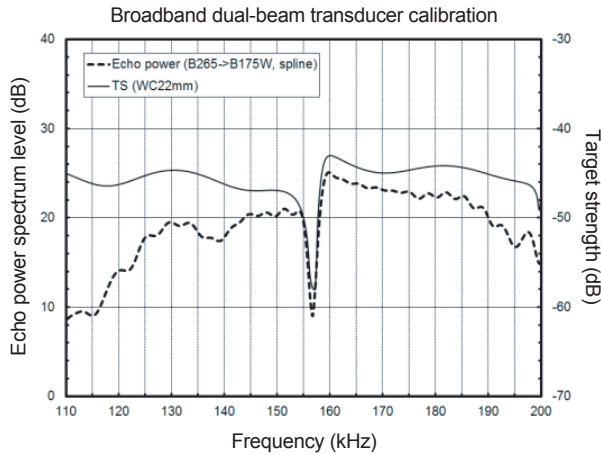


Fig. 8. Echo response characteristics for the wide-beam channel of the chirp dual-beam echo sounder. The power spectrum curve of the frequency-dependent echo signal measured from a 22 mm tungsten carbide sphere for the wide-beam channel was compared with the theoretical frequency-dependent curve of the target strength.

증실험은 WC38 검증표적을 대상으로 수행하였다. 즉, 음향산란강도가 이론적으로 규명되어 있는 WC38 검증표적을 대상으로 110~200 kHz 주파수 범위에 대한 반사강도의 주파수 의존성 패턴을 수치 시뮬레이션한 후, 이것을 본 연구의 광대역 dual-beam 어군탐지기에 의한 반사강도의 측정 패턴과 서로 비교, 분석하여 성능평가를 수행하였다. 이를 위해 WC38 검증표적에 대한 wide beam 채널과 narrow beam 채널에 대한 시간과 주파수 응답의 지향각 의존성 패턴을 각각 구하였는데, 그 결과는 Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12와 같다. Fig. 10a와 Fig. 10b는 Fig. 5에 나타난 WC22 교정구에서와 같이 송신용 narrow beam 음향변환기의 음축과 수신인 방향으로 WC38 검증표적을 beam 외측에서 내측으로 이동시키면서 각각 수신용 wide beam 음향변환기(Fig. 10a)와 narrow beam 음향변환기(Fig. 10b)를 통해 수신한 echo 신호의 시간과 주파수 응답의 지향각 의존성 패턴을 나타낸 것이다. Fig. 10a와 Fig. 10b에서 각각 위쪽은 시간응답의 지향각 의존성 패턴이고, 아래쪽은 주파수 응답의 지향각 의존성 패턴이다. 또한, wide beam 채널과 narrow beam 채널에 대한 WC38 검증표적의 시간-주파수 응답특성과 주파수 스펙트럼 패턴을 나타낸 결과는 각각 Fig. 11 및 Fig. 12와 같다.

Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12에서 WC38 검증표적으로부터 산란된 echo 응답신호가 wide beam 채널과 narrow beam 채널에 각각 수신될 때, echo 신호진폭은 이들 각 수신채널에 대한 감도특성, 즉, Fig. 8과 Fig. 9에서 점선으로 나타난 wide beam 채널과 narrow beam 채널의 주파수 의존적인 시스템 상수  $Z_N(f)$ 와  $Z_W(f)$ 에 동조하여 변동하였다. 본 연구에서 식 (6)에 의해 정의된 반사강도 추정식을 이용할 때, 주파수 의존적인 시스템 상

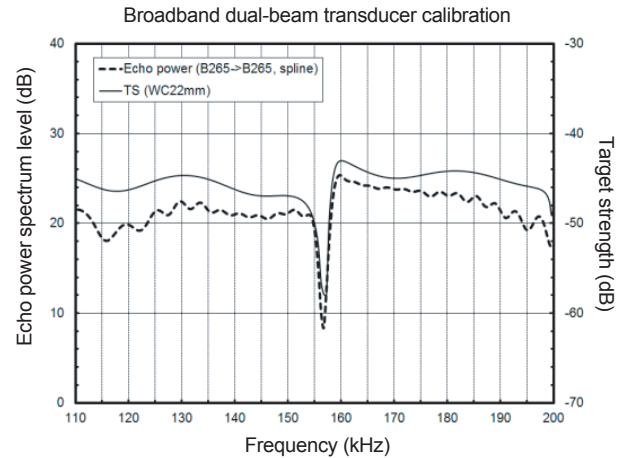


Fig. 9. Echo response characteristics for the narrow-beam channel of the chirp dual-beam echo sounder. The power spectrum curve of the frequency-dependent echo signal measured from a 22 mm tungsten carbide sphere for the narrow-beam channel was compared with the theoretical frequency-dependent curve of the target strength.

수  $Z_N(f)$ 와  $Z_W(f)$ 는 WC22 교정구에 대한 Fig. 8과 Fig. 9의 실험결과를 이용하였다. 한편, 식 (6)의 WC38 검증표적에 대한 echo 신호의 주파수 스펙트럼 패턴  $E_N(f)$ 와  $E_W(f)$ 를 측정된 결과는 Fig. 11 및 Fig. 12와 같다. 먼저, Fig. 10의 WC38 검증표적에 대한 echo 신호의 주파수 응답특성을 살펴볼 때, Fig. 5의 WC22 교정구에서와 같이 wide beam 채널의 경우에는 110~200 kHz 범위에서 음향변환기(B175HW-W)의 지향각 변화에 거의 영향을 받지 않는 특성을 나타내었지만, narrow beam 채널의 경우에는 주파수의 증가에 따른 echo 신호의 지향성 의존성이 지향각 변화에 따라 매우 크게 변동하는 특성을 나타내었다. 한편, Fig. 11과 Fig. 12의 음축상에 위치한 WC38 검증표적으로부터 측정된 wide beam 채널과 narrow beam 채널에 대한 echo 신호의 시간-주파수 응답특성을 살펴볼 때, Fig. 11의 wide beam 채널에서는 114.75 kHz에서 미약한 공진현상이 출현한 후, 100 kHz에서부터 130 kHz까지의 급격한 응답진폭의 변동 없이 -30 dB로부터 -3.5 dB까지 점진적으로 증가하는 현상을 나타내었다. 그 후, 134.77 kHz에서는 매우 돌발적인 공진산란현상이 발생하여 deep null 현상이 출현하였고, 곧이어 172.36 kHz에서 다시 공진산란이 나타난 이후에는 200 kHz까지 응답레벨이 서서히 감소하는 응답패턴을 나타내었다. 이에 반해, Fig. 12의 narrow beam 채널에 있어서는 100 kHz에서부터 110 kHz 부근까지의 좁은 주파수 대역에서 응답레벨이 -15 dB로부터 -1.5 dB까지 급격히 증가한 후, 115.23 kHz에서는 공진산란으로 인한 null 현상이 발생하여 echo 진폭이 일시적으로 감소하였다. 그 후, echo 진폭은 점진적으로 회복하는 경향을 나타내었지만, wide beam 채널에서와 같이 133.47 kHz

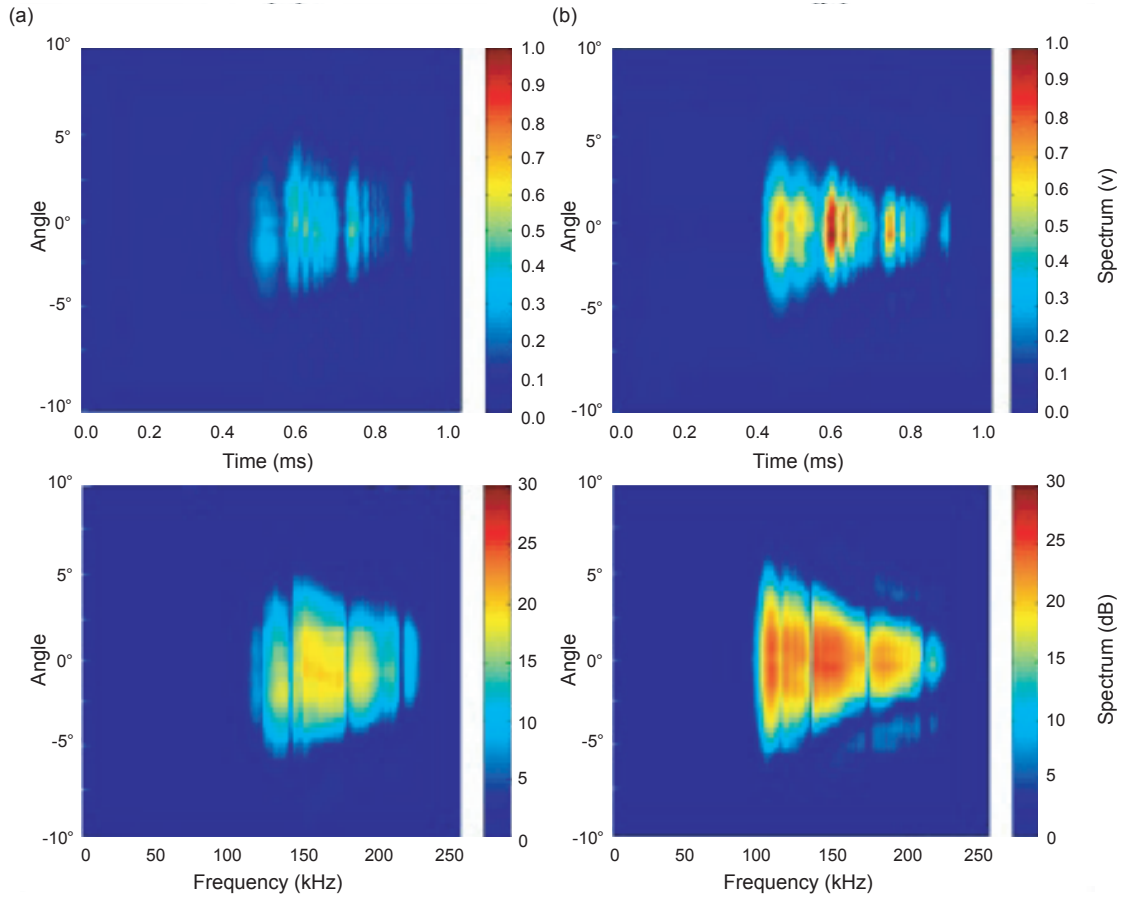


Fig. 10. Time response (upper) and frequency response images (lower) for the echo signals measured from a 38 mm tungsten carbide sphere as a function of rotation angle for the wide- (a) and narrow-beam channels (b) of the broadband dual-beam transducers. To quantitatively compare the sensitivity difference between wide and narrow-beam channels, the frequency-dependent echo response for the wide-beam channel was normalized relatively to the maximum echo amplitude on the beam axis for the narrow-beam channel.

에서 다시 강한 공진산란현상으로 인해 deep null 현상이 출현하였고, 곧이어 172.36 kHz에서도 다시 공진산란이 나타난 이후에는 200 kHz까지 응답레벨이 매우 완만하게 감소하는 응답 패턴을 나타내었다.

## 고 찰

본 연구에서 사용한 chirp 데이터 수록 및 처리 시스템, 즉, 광대역 dual-beam 어군탐지 시스템에 대한 검증실험을 수행한 결과는 Fig. 13과 같다. 본 연구에서는 110–200 kHz의 주파수 대역을 대상으로 WC38 검증표적을 사용하여 광대역 dual-beam 어군탐지 시스템의 성능특성을 평가하였다.

Fig. 13은 교정구로부터 산란되는 경면 반사파, 원주 산란파 및 내부 반사파 등의 합성 echo 성분을 모두 포함하는 반사강도의 주파수 응답패턴을 나타낸 것인데, 실선은 수치 시뮬레이션에 의한 WC 교정구의 이론 반사강도 패턴이고, 원형 심볼은

측정 반사강도의 주파수 의존성 패턴이다. 여기서, 종축은 반사강도(dB)이고, 횡축은 주파수(kHz)이다. Fig. 13의 수치 시뮬레이션에 대한 반사강도의 주파수 의존성 패턴에서 공진 산란이 나타나는 115.2 kHz, 134.3 kHz와 172.4 kHz 부근에서는 echo 생성에 기여하는 원주 산란파와 내부 반사파의 간섭성분이 경면 반사파 신호와 다시 반복적으로 간섭을 일으킴으로써, echo 응답신호의 진폭이 급격하게 감소하는 deep null 현상이 나타났다. 특히, 134.3 kHz와 172.4 kHz 부근에서는 매우 강한 deep null 현상으로 인해 반사강도 레벨이 각각 -55.6 dB, -53.1 dB까지 급격히 저하하였다. 본 연구에서는 고주파수 영역에서 소너 시스템의 음향학적 교정에 많이 사용되는 WC22 교정구를 사용하여 Fig. 1과 식 (6)에 나타낸 chirp 데이터 수록 및 처리 시스템의 narrow beam 송수신계에 대한 시스템 상수  $Z_n(f)$ 와 wide beam 송수신계에 대한 시스템 상수  $Z_w(f)$ 를 각각 도출하였다. 또한, 이들 교정상수(calibration constant)를 이용하여 WC38 검증표적에 대한 반사강도의 주파수 의존성 패턴을

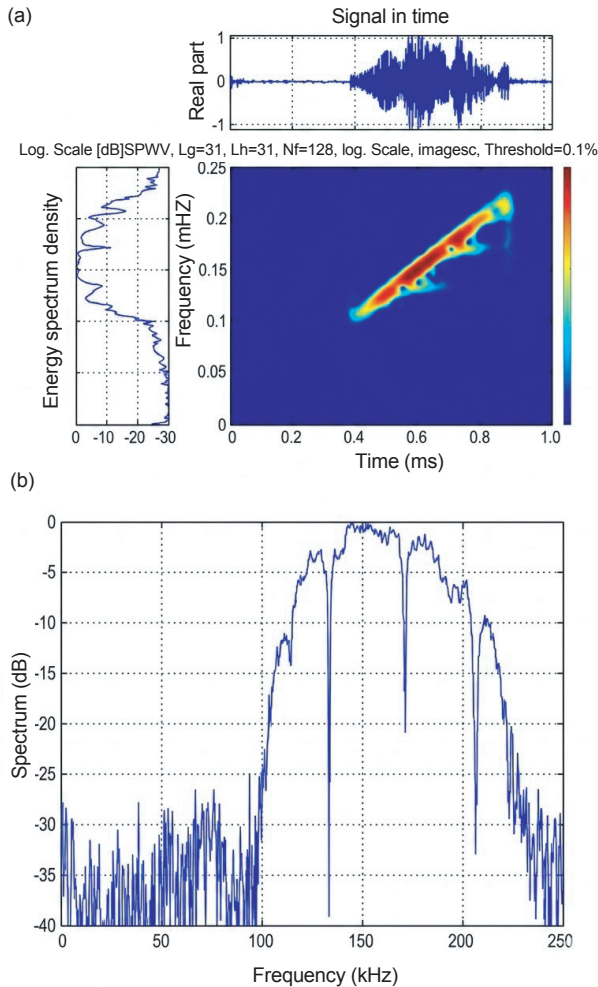


Fig. 11. The echo signal measured from a 38 mm tungsten carbide sphere located on the sound beam axis for the wide-beam channel. a, Time-frequency response characteristic; b, Frequency spectrum. A deep null in the frequency spectrum occurs at the frequency corresponding to the null position for the theoretical target strength of a 38 mm tungsten carbide sphere.

측정하고, 이 패턴을 수치 시뮬레이션에 의한 결과와 비교함으로써 성능특성에 대한 검증은 수행하였다. 이 검증실험의 결과, Fig. 13에서 알 수 있는 바와 같이 본 연구에서 설계, 개발한 광대역 dual-beam 어군탐지 시스템에 의한 측정 반사강도의 주파수 의존성 패턴은 시뮬레이션에 의한 반사강도의 주파수 의존성 패턴과 매우 잘 일치하는 경향을 나타내었다. 또한, 110~200 kHz의 주파수 대역에 대한 측정반사강도의 평균치(-40.19 dB)와 시뮬레이션 반사강도의 평균치(-39.33 dB) 사이에는 0.86 dB의 매우 근소한 오차가 관측되었다. 이 결과를 고려할 때, 본 연구의 chirp 데이터 수록 및 처리 시스템을 광대역 dual-beam 어군탐지 시스템으로 사용하는 경우, 어류 반사강도의 추정정

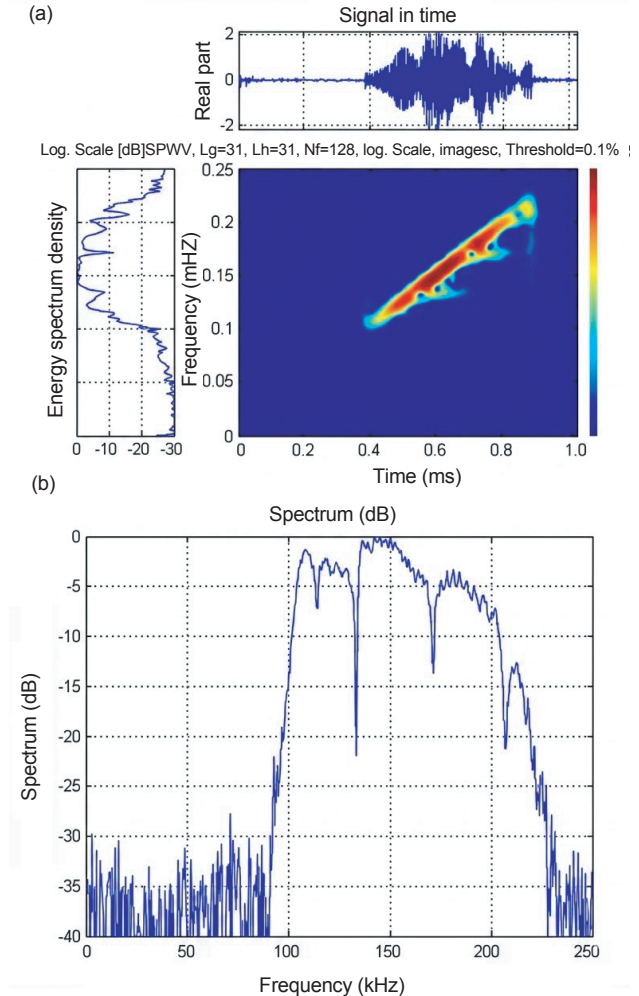


Fig. 12. The echo signal measured from a 38 mm tungsten carbide sphere located on the sound beam axis for the narrow-beam channel. a, Time-frequency response characteristic; b, Frequency spectrum. A deep null in the frequency spectrum occurs at the frequency corresponding to the null position for the theoretical target strength of a 38 mm tungsten carbide sphere.

도는 기존의 split beam 어군탐지기와 비교하여도 충분한 신뢰도를 가질 수 있을 것으로 판단된다. 특히, 수치 시뮬레이션의 반사강도 패턴에 출현하는 공진산란에 기인하는 deep null 패턴은 본 연구의 광대역 dual-beam 어군탐지 시스템에 의한 반사강도 응답패턴에서도 거의 같은 주파수에서 유사한 레벨로서 검출되었다. 즉, 시뮬레이션 반사강도 패턴에 대한 deep null 주파수 115.2 kHz, 134.3 kHz와 172.4 kHz에 대응되는 측정반사강도에 대한 deep null 주파수는 각각 114.3 kHz, 134.8 kHz와 172.4 kHz에서 검출되었고, 그 각 주파수에서의 이론 및 측정 반사강도의 차는 각각 0.5 dB, 4.3 dB, 2.5 dB이었다.

본 연구에서는 Lee (2018)가 개발한 chirp 데이터 수록 및 처

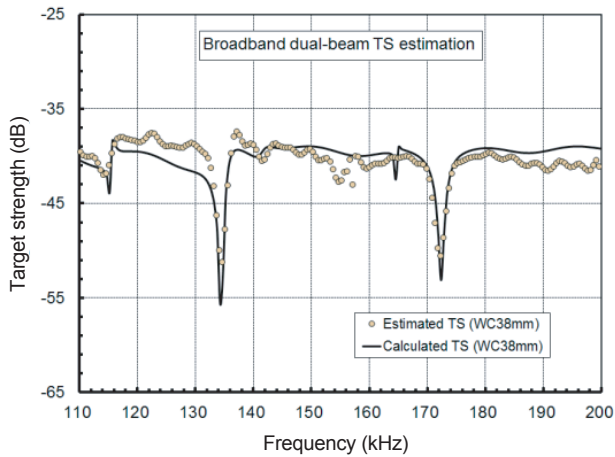


Fig. 13. Comparison of simulated and measured frequency-dependent target strength patterns of a 38 mm tungsten carbide sphere (WC38) estimated with the 22 mm tungsten carbide sphere (WC22) in the broadband dual-beam echo sounder.

리 시스템을 광대역 dual-beam 어군탐지기로서 활용하기 위한 연구를 수행하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 먼저, chirp 데이터 수록 및 처리 시스템과 narrow beam (송신용) 및 wide beam (수신용)의 chirp 음향변환기를 조합하여 구성한 광대역 dual-beam 어군탐지 시스템은 어로현장에서 선택적 어업을 수행하는데 요구되는 어류의 체장조성 정보를 정량적으로 제공할 수 있다는 것이 검증되었다. 특히, chirp 데이터 수록 및 처리 시스템의 가용 주파수 대역인 110–200 kHz의 주파수 범위에서 WC22 교정구를 사용하여 dual-beam 시스템의 narrow beam 채널과 wide beam 채널의 송수신감도를 각각 도출하고, 이들 감도 데이터를 바탕으로 직경 WC38 검증표적에 대한 이론 및 측정 반사강도를 추출하여 비교, 분석한 결과, 그 반사강도의 차는 0.86 dB로서, 매우 높은 측정 정확도를 나타내었다. WC38 검증표적의 측정 반사강도는 110–200 kHz의 주파수 대역의 일부의 주파수 영역에서는 이론 반사강도와 약간의 큰 변동특성을 나타내었지만, 전체적인 변동패턴의 경향은 매우 잘 일치하였다. 특히, 본 연구에서 설계, 개발한 chirp 데이터 수록 및 처리 시스템을 광대역 dual-beam 어군탐지기로 활용하는 경우, 탐지 어종 고유의 시간-주파수 echo 이미지를 효과적으로 얻을 수 있기 때문에 다중 주파수를 이용한 분석보다 더욱 세세하게 어종을 식별할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 현재 어족생물의 체장조성을 추정하기 위해 split beam 방식의 어군탐지기가 널리 보급되고 있지만, 본 연구의 chirp 데이터 수록 및 처리 시스템의 dual-beam 모드를 활용하면, 음향 빔 내부에 분포하는 어족생물로부터 산란되는 echo 신호의 송수파기에 대한 지향특성의 영향을 효과적으로 제거할 수 있기 때문에 어로 현장에서 탐지한 어족생물의 체장조성을 더욱 더 정량적으로 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

## 사 사

본 논문은 2025년 국립부경대학교 자율창의학술연구비(수중음향을 이용한 지속가능한 어업자원평가 향상에 관한 연구, 202508870001)의 지원을 받아 수행되었으며, 본 논문을 사려깊게 검토하여 주신 심사위원님과 편집위원님께 감사드립니다.

## References

- Airmar Technology Corporation. 2013. Technical Data Catalog. Airmar Technology corporation, Milford, NH, U.S.A., 274-325.
- Airmar Technology Corporation. 2015a. Technical Data Catalog. D-18809-rev5(B265H). Airmar Technology corporation, Milford, NH, U.S.A., 401-402.
- Airmar Technology Corporation. 2015b. Technical Data Catalog. D-18815-rev5(B175HW). Airmar Technology corporation, Milford, NH, U.S.A., 411-412.
- Burdic W. 1991. Underwater Acoustic System Analysis. Prentice Hall, Hoboken, NJ, U.S.A., 327-332.
- Choi SG, Han I, An DH, Chung SD, Yoon EA and Lee K. 2018. Estimating the abundance of antarctic krill *Euphausia superba* using a commercial trawl vessel. Korean J Fish Aquat Sci 51, 435-443. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2018.0435>.
- Digilent. 2011. Digilent Nexys2 Board Reference Manual. Digilent Inc., Pullman, WA, U.S.A., 1-17.
- Gądek K, Dudzik M and Stręk A. 2014. A novel three-head ultrasonic system for distance measurements based on the correlation method. Meas Sci Rev 14, 331-336. <http://doi.org/10.2478/msr-2014-0045>.
- Kang MH, Cho YH, La HS, Son WJ, Yun HJ, Adrianus A and An YS. 2022. The first attempt of utilization of a wideband autonomous acoustic system and its general knowledge on analyzing the wideband acoustic data. J Korean Soc Fish Ocean Technol 58, 130-140. <https://doi.org/10.3796/KS-FOT.2022.58.2.130>
- Levanon N. 1988. Radar Principles. John Wiley and Sons, New York, NY, U.S.A., 285-297.
- Lee DJ. 2015. Time-frequency analysis of broadband acoustic scattering from chub mackerel *Scomber japonicas*, goldeye rockfish *Sebastes thompsoni*, and fat greenling *Hexagrammos otakii*. Korean J Fish Aquat Sci 48, 221-232. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2015.0221>.
- Lee DJ. 2016. Acoustic identification of six fish species using an artificial neural network. Korean J Fish Aquat Sci 49, 224-233. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2016.0224>.
- Lee DJ. 2018. Performance characteristics of chirp data acquisition and processing system for time-frequency analysis of broadband acoustic scattering signals from fish schools. Korean J Fish Aquat Sci 51, 178-186. <https://doi.org/10.5657/>

- KFAS.2018.0178.
- Lee DJ. 2021. Performance characteristics of a 50-kHz split-beam data acquisition and processing system. Korean J Fish Aquat Sci 54, 798-807. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2021.0798>.
- Lee DJ and Lee WS. 2011. Development of split-beam acoustic transducer for a 50 kHz fish sizing echo sounder. Korean J Fish Aquat Sci 44, 413-422. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2011.0413>.
- Lee DJ and Shin HI. 2001. Development of a split beam transducer for measuring fish size distribution. Bull Korean Soc Fish Tech 37, 196-213.
- Lee DJ, Kang HY and Pak YY. 2016. Time-frequency feature extraction of broadband echo signals from individual live fish for species identification. Korean J Fish Aquat Sci 49, 214-223. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2016.0214>.
- Lee DJ, Lee KH, Jung BK and Kang HY. 2022. Calibration of a chirp sonar system using seven tungsten carbide spheres of different sizes. Korean J Fish Aquat Sci 55, 207-217. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2022.0207>.
- Lee H, Lee K, Yoon EA, Hwang K, Choi J and Park TG. 2015. Target strength characteristics of sailfin sandfish (*Arctosco-  
pus japonicus*) using ex situ experiment and acoustic model. J Korean Soc Fish Ocean Technol 51, 405-413. <https://doi.org/10.3796/KSFT.2015.51.3.405>.
- Mahafza BR. 1998. Introduction to Radar Analysis. CRC Press, Boca Raton, FL, U.S.A., 251-254.
- Park G, Mukai T and Lee K. 2025. Species identification and frequency characteristic of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) using hydro-acoustics. J Mar Sci Eng 13, 291. <https://doi.org/10.3390/jmse13020291>.
- Park YG, Seo YI, Oh TY, Park JS, Jang CS and Kang MH. 2015. The multi-frequency characteristics of anchovy schools in the east of South Sea of South Korea. J Kor Soc Fish Ocean Technol 51, 235-244. <https://doi.org/10.3796/KSFT.2015.51.2.235>.
- Simmonds EJ, Armstrong F and Copland PJ. 1996. Species identification using wideband backscatter with neural network and discriminant analysis. ICES J Mar Sci 53, 189-195. <https://doi.org/10.1006/jmsc.1996.0021>.
- Simmonds J and MacLennan D. 2005. Fisheries Acoustics: Theory and Practice. Blackwell Publishing Ltd., Oxford, U.K., 70-126.
- Traynor JJ and Ehrenberg JE. 1979. Evaluation of the dual beam acoustic fish target strength measurement method. J Fish Res Board Can 36, 1065-1071. <https://doi.org/10.1139/f79-149>.
- Tsagarakis K, Giannoulaki M, Pyrounaki MM and Machias A. 2015. Species identification of small pelagic fish schools by means of hydroacoustics in the Eastern Mediterranean Sea. Medit Mar Sci 16, 151-161. <https://doi.org/10.12681/mms.799>.
- Wuillez M, Ressler PH, Wilson CD and Horne JK. 2012. Multifrequency species classification of acoustic-trawl survey data using semi-supervised learning with class discovery. J Acoust Soc Am 131, EL184-EL190. <https://doi.org/10.1121/1.3678685>.