

크기가 다른 7개의 탄화 텅스텐 구를 이용한 Chirp 소너 시스템의 교정

이대재* · 이경훈¹ · 정봉규² · 강희영³

부경대학교 해양생산시스템관리학부, ¹전남대학교 해양생산관리학과, ²경상대학교 해양경찰시스템학과, ³국립해양조사원 해도수료과

Calibration of a Chirp Sonar System Using Seven Tungsten Carbide Spheres of Different Sizes

Dae-Jae Lee*, Kyounghoon Lee¹, Bong-Kyu Jung² and Hee-Young Kang³

Division of Marine Production System Management, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

¹Division of Marine Production Management, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea

²Department of Marine Police System, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Republic of Korea

³Nautical Chart Division, Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, Busan 49111, Republic of Korea

The accurate calibration of broadband echo sounders is essential for providing high quality acoustic information for fisheries applications. The increased range resolution of broadband echo sounder systems improves the detection and characterization of targets near boundaries, such as fish near the seabed. Most echo sounder systems are calibrated using tungsten-carbide (WC) spheres. For accurate calibration, it is necessary to select WC spheres of optimized diameters used frequently to calibrate echo sounder systems. For these purposes, the measured and simulated target strength (TS) data for seven WC spheres of different sizes were compared across a bandwidth of 100–200 kHz. The frequency-dependent TS pattern for the specular wave measured from two WC spheres using the fractional Fourier transform was also estimated and analyzed. Comparative results are presented for all the spheres and the best average precision of 0.15 dB was obtained for the 22 mm WC sphere.

Keywords: Acoustic calibration, Broadband echo sounder, Specular wave, Tungsten-carbide spheres, Chirp transducer

서 론

세계 각국에서는 과거 수십년에 걸쳐 단일 주파수를 사용하는 음향탐지 시스템을 어업생물의 자원량 평가, 해양환경 및 해저지형의 실시간 모니터링 등과 같은 수산 및 해양계측분야에 매우 광범위하게 사용하여 왔다. 그러나, 최근에 들어서는 IT (information technology) 기술의 진보와 더불어 주변산업기술의 비약적인 발전에 힘입어 이들 기술을 기반으로 하는 정보처리 및 그 응용기술이 눈부신 발전을 거듭하고 있는 실정이다. 그 중에서도 특히, 수산분야에서의 주목할 만한 변화는 단일 주파수를 사용하던 기존의 어로 및 어업자원 모니터링 기법이 넓은 주파수 대역을 사용하는 광대역 음향계측 시스템으로 급속하게 전환되고 있는 점이다(Simmons et al., 1996; Chu and Stanton,

1998; Simmonds and MacLennan, 2005; Stanton et al., 2010). 이와 같이 협대역 계측기법이 광대역 계측기법으로 대체되고 있는 배경에는 넓은 주파수 대역의 음향신호를 이용하는 chirp (compressed high intensity radar pulse) 소너 시스템이 실용화되면서부터이다. 즉, 광대역 소너 시스템을 이용하면, 넓은 주파수 스펙트럼 대역으로부터 물표의 식별과 관련된 매우 다양하고, 정량적인 주파수 응답성분을 추출할 수 있을 뿐만 아니라, 펄스압축기술을 활용하여 수중물표 상호간의 거리분해능까지도 개선할 수 있기 때문이다. 또한, 낮은 출력의 chirp 소너 시스템에서도 SNR (signal to noise ratio, 신호대 잡음비)의 개선을 통해 매우 높은 분해능의 echogram image를 얻을 수 있다 (Lee et al., 2015; Lavery et al., 2017). 그러나, 이와 같은 chirp 소너 시스템을 어업생물자원이나 해양환경의 계측분야에 활용

*Corresponding author: Tel: +82. 51. 629. 5889 Fax: +82. 51. 629. 5885

E-mail address: daejael@pknu.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.2022.0207>

Korean J Fish Aquat Sci 55(2), 207-217, April 2022

Received 10 February 2022; Revised 7 March 2022; Accepted 8 March 2022

저자 직위: 이대재(교수), 이경훈(교수), 정봉규(교수), 강희영(팀장)

하는데 있어서는 소너 시스템의 가용 주파수 대역에 대한 교정, 즉, 음향변환기를 포함하는 신호처리장치 전체의 시스템 계통에 대한 시간 및 주파수 감도특성을 정확하게 파악하여야 한다. 실제 이와 같은 소너의 시간-주파수 감도특성을 측정하는 문제는 매우 복잡하다. 따라서, 현재에는 음향산란특성이 이론적으로 규명되어 있는 특수한 재질의 구(sphere)를 사용하여 소너 시스템을 구성하는 모든 요소에 대한 시간 및 주파수 감도특성을 종합적으로 평가하는 방법이 가장 널리 이용되고 있다. 현재, 이와 같은 간접교정을 수행하는 데에는 주로 코발트 성분이 약 6~10% 정도 포함된 매우 무겁고 단단한 초경구(super hard ball), 즉, 탄화 텅스텐 구(tungsten-carbide sphere; WC 교정구)가 사용된다(Foote, 1984). WC 교정구를 사용하여 chirp 소너 시스템의 음향학적 교정을 수행하는 데는 세심한 주의가 요구된다. 특히, 이들 구의 공진산란영역에서는 매우 불안정한 null 주파수 응답이 출현하는 문제가 발생한다. 이 때문에 chirp 소너 시스템의 가용 주파수 대역에서 null 주파수 응답이 출현하지 않는 특정 사이즈의 WC 교정구를 선택하여 소너 시스템의 감도교정을 수행하여야 한다.

따라서, 본 연구에서는 자체 개발한 chirp 소너 시스템(Lee et al., 2015)의 교정에 사용할 WC 교정구의 음향산란특성에 관한 데이터를 얻기 위한 목적으로, 사이즈가 서로 다른 7개의 WC 교정구를 대상으로 100~200 kHz 주파수 대역에 대한 반사강도의 이론적 및 실험적인 응답특성과 경면 반사파(specular wave)에 대한 주파수 의존성 패턴을 측정하여 비교, 분석하였다.

재료 및 방법

WC 교정구의 재질 특성

실험에 사용한 교정구는 코발트 성분이 약 6% 정도 포함된 WC 교정구이다. 본 연구에서 WC 교정구를 선택한 이유는 현재 세계 여러 나라에서 각종 소너 시스템의 음향학적 교정에 가장 많이 사용되고 있기 때문이다. 본 연구의 chirp 소너 시스템의 교정에 사용한 WC 교정구의 직경은 20~60 mm 범위로서, 직경(공칭직경)이 서로 다른 20, 22, 30, 38, 40, 51, 60 mm의 7종류에 대한 WC 교정구(HRT Precision Steel Ball Co., Guangdong, China)를 주문, 제작하여 사용하였다. 이들 WC 교정구의 음향반사강도에 대한 주파수 의존성을 수치 시뮬레이션하는 데 필요한 밀도, 음속 등과 같은 재질특성은 제작회사로부터 입수한 데이터와 Demer et al. (2015)이 제시한 데이터를 바탕으로 결정하였는데, 밀도, 종방향 음속(longitudinal sound speed), 횡방향 음속(transverse sound speed)은 각각 14,890 kg/m³, 6,845 m/s, 4,132 m/s이었다. 실험 당시 WC 교정구가 현수된 실험수조의 수온은 20.2°C였고, 또한, WC 교정구의 수치 시뮬레이션은 실험수조에 수용된 담수의 밀도와 음속을 각각 1,025 kg/m³, 1,495 m/s로 설정하여 수행하였다(Simmonds and MacLennan, 2005).

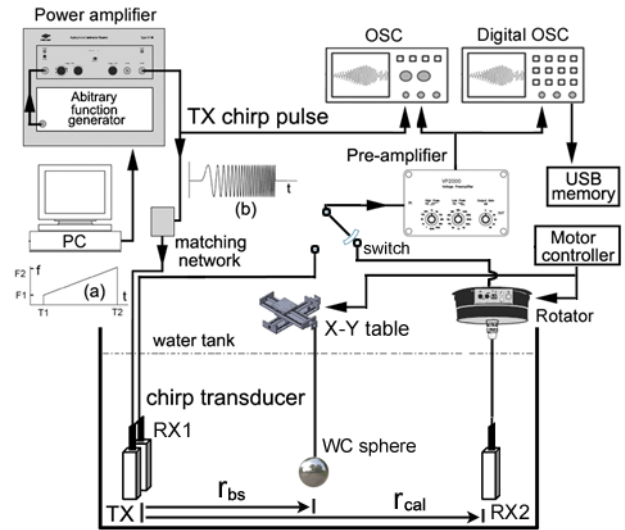


Fig. 1. Schematic diagram of the broadband echo sounder to be calibrated using the WC sphere. A PC-based broadband echo sounder is composed of a chirp transceiver, a broadband signal processing module, a broadband acoustic transducer and an additional data monitoring system. a, Diagram of time and frequency domains for generating the chirp pulse signal; b, Transmitting chirp pulse signal. WC, Tungsten carbide; chirp, Compressed high intensity radar pulse.

Chirp 소너 시스템의 음향학적 교정

본 연구에서는 직경이 서로 다른 7개의 WC 교정구를 사용하여 Lee et al. (2015)이 개발한 chirp 소너 시스템의 음향학적 교정을 수행하였다. 실험장치의 구성은 Fig. 1에서와 같이 PC에서 생성한 펄스폭 0.3 ms, 펄스반복주기 0.02 s의 chirp 펄스 신호를 임의파형발생기(Model 33120A; HP, Palo Alto, Santa Clara, CA, USA)에 저장해 놓고, 이 chirp 펄스신호를 호출하여 주파수 의존적인 echo 신호를 측정하였다. 이 때, 임의파형발생기로부터 호출된 up-chirp 펄스의 출력전압은 400 mV, 주파수 대역은 90~280 kHz로 조정하여 전력증폭기(Model 2713; B&K, Nærum, Denmark)에서 40 dB로 증폭하였다. 이렇게 생성된 송신펄스신호는 정합회로에서 임피던스를 매칭(matching)시킨 후, 송파용 광대역 음향변환기를 사용하여 수중으로 발사하였다. Fig. 1에서 수파용 광대역 음향변환기를 통해 측정된 WC 교정구로부터의 chirp echo 신호는 대역필터가 내장된 전치증폭기(Model VP2000; RESON, Slangerup, Denmark)로부터 필터링 및 증폭한 후, 디지털 오실로스코프(Model DS1530; EZ, Gwangju, Korea) 및 스펙트럼 분석기(Model LSA-30; LIG Nex1, Yongin, Korea)의 USB 인터페이스를 통해 시간 및 주파수 응답특성 등을 수록하였다.

Chirp 소너 시스템의 교정은 대형실험수조(L×B×D, 6.0×5.0×5.0 m)에서 2개의 동일한 광대역 음향변환기(Model

R203; Airmar Technology Corporation, Milford, NH, USA) 를 사용하여 2단계의 과정을 거쳐 수행되었다. 제1단계에서는 수조 양쪽 끝단 부근에 2개의 음향변환기 방사면이 서로 마주 보도록 음축을 서로 일치시키고, 음향변환기 사이의 간격이 3.0 m (r_s)가 되도록 고정, 설치하였다. 이 때, chirp 소너 시스템에서 생성된 전기적인 chirp 펄스신호가 음향변환기를 통해 발사되면, TVG (time varied gain) 증폭기와 수신부의 신호처리모듈을 거쳐 수신되는 직접파의 chirp 펄스신호를 측정하여 송·수신 FOM (figure of merit) 응답특성, 즉, 직접파의 응답감도특성을 측정하였다. 제2단계에서는 2개의 음향변환기를 서로 나란히 밀착, 고정하고, 각 음향변환기의 음축이 서로 평행하도록 조정한 후, 이들 음향변환기의 음축 중앙으로부터 약 1.5 m (r_c) 떨어진 지점에 WC 교정구를 현수시킨 상태에서 WC 교정구로부터 산란된 chirp echo 신호의 시간 및 주파수 응답특성을 측정하였다.

WC 교정구의 형상함수 계산 및 반사강도 측정

Chirp 소너 시스템의 음향학적 교정에 사용한 WC 교정구의 주파수 의존적인 이론 반사강도 패턴 $TS_c(\omega)$ 는 수식(1)에 의해 구할 수 있다(MacLennan, 1981; MacLennan and Dunn, 1984).

$$TS_c(\omega) = 10 \log \left| \frac{a}{2} f_{\infty}(\omega) \right|^2 \dots\dots\dots (1)$$

여기서, ω 는 각주파수($\omega=2\pi f$), a 는 WC 교정구의 반경, $f_{\infty}(\omega)$ 는 WC 교정구의 형상함수(form function)이다. 본 연구에서 실험에 사용한 WC 교정구의 형상함수 $f_{\infty}(\omega)$ 는 MacLennan (1981)이 제시한 알고리즘에 따라 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 한편, WC 교정구의 주파수 의존적인 측정 반사강도 패턴 $TS_m(\omega)$ 는 수식(2)에 의해 구할 수 있다(Chu and Stanton, 1998).

$$TS_m(\omega) = 10 \log |f_{bs}(\omega)|^2 \dots\dots\dots (2)$$

여기서, $f_{bs}(\omega)$ 는 WC 교정구에 의한 산란진폭(scattering amplitude)의 주파수 응답으로서, $f_{bs}(\omega)$ 는 수식(3)에 의해 구할 수 있다.

$$f_{bs}(\omega) = \frac{V_{bs}^{(r)}(\omega)}{V_{cal}^{(r)}(\omega)} \cdot \frac{V_{cal}^{(t)}(\omega)}{V_{bs}^{(t)}(\omega)} \cdot \frac{r_{bs}^2}{r_{cal}} \dots\dots\dots (3)$$

Fig. 1에서 chirp 소너 시스템의 교정모드(calibration mode)에 대한 FOM 응답특성은 2개의 광대역 음향변환기의 음축이 서로 일치하도록 거리 r_{cal} 만큼 분리시켜 설치한 상태에서 측정하였다. 이 때, $V_{cal}^{(t)}(\omega)$ 는 송파기에 공급된 전기 chirp 펄스신호의 주파수 응답특성, $V_{cal}^{(r)}(\omega)$ 는 수파기에 수신된 직접파 chirp 펄스신호의 주파수 응답특성이다. 한편, WC 교정구의 산란용

답특성은 Fig. 1에서와 같이 2개의 음향변환기를 나란히 인접시켜 설치한 후, 송파기의 방사면으로부터 r_{bs} 만큼 떨어진 음축상의 위치에 WC 교정구를 현수시킨 상태에서 측정하였다. 이 때, $V_{bs}^{(t)}(\omega)$ 는 산란모드(backscattering mode)의 송파기에 공급된 전기 chirp 펄스신호의 주파수 응답특성, $V_{bs}^{(r)}(\omega)$ 는 산란모드의 수파기에 수신된 chirp echo 신호의 주파수 응답특성이다. 본 연구에서는 직경이 서로 다른 7개의 WC 교정구를 대상으로 수치 시뮬레이션에 의한 이론 반사강도의 주파수 의존성 패턴 $TS_c(\omega)$ 와 측정 반사강도의 주파수 의존성 패턴 $TS_m(\omega)$ 을 각각 측정하고, 이들을 서로 비교, 분석하였다.

경면 반사파 신호의 추출과 반사강도의 추정

광대역 소너 시스템에 대한 주파수 의존적인 산란특성은 교정구의 직경, 재질특성, chirp 펄스신호의 지속시간 등에 따라 교정구의 전면(front interface)에서 반사하는 경면 반사파, 교정구의 표면을 따라 진행되는 원주 산란파(circumferential wave), 또한, 교정구 내부에서 반사되는 내부 반사파(internal wave) 등의 성분들이 서로 간섭하는 현상 때문에 매우 불규칙하게 변동한다. 이와 같은 산란파 성분들이 서로 상쇄 및 보강간섭을 일으키면, 교정구의 echo 응답특성에 null 응답패턴이 출현하는 문제가 발생한다. 특히, null 응답에 인접한 주파수 영역에서의 echo 응답특성은 WC 직경이나 재질특성 등의 미소한 변화에도 파형의 왜곡현상과 신호 진폭의 저하 현상이 매우 급격하게 발생한다. 이 때문에 협대역 소너 시스템에서는 이와 같은 echo 응답의 불안정성 문제를 회피하기 위해 소너의 동작 주파수에서 null 패턴이 나타나지 않는 교정구의 직경을 선택하여 음향학적 교정을 수행하게 된다. 또한, 광대역 소너 시스템의 음향학적 교정을 수행할 때에도 WC 교정구의 주파수 의존적인 산란패턴에 출현하는 echo 진폭의 급격한 저하현상, 즉, deep null 응답현상의 문제를 보정할 필요가 있다. 현재, deep null 효과를 억제시키기 위한 방법으로서, 직경과 재질특성이 서로 다른 다수의 교정구를 연직선상에 배열하여 광대역 소너 시스템을 교정하는 방법(Atkins et al., 2008), 또한, 교정구에서 산란되는 여러 산란파 성분중에서 주파수에 거의 의존하지 않는 경면 반사파에 대한 echo 응답신호를 추출하여 광대역 소너 시스템을 교정하는 방법 등이 이용되고 있다(Stanton and Chu, 2008). 본 연구에서는 후자에 대한 교정방법에 주목하여 경면 반사파 신호를 추출하여 그 반사강도의 주파수 의존성 패턴을 추정하는 기법에 대한 연구도 함께 수행하였다. 이를 위해 먼저 실험에 사용한 7개의 WC 교정구 중에서 현재 세계적으로 18–200 kHz의 주파수 대역에서 소너 시스템의 음향학적 교정에 가장 많이 사용되고 있는 직경 22 mm (Nesse et al., 2009; Demer et al., 2015)와 직경 38 mm (Demer et al., 2015)의 WC 교정구에 대한 광대역 echo 신호의 시간-주파수 echo 응답특성을 추정하였다(Imberger and Boashash, 1986; Shui et al., 2007; Dong and Cui, 2012). 그 후, 이들 시간-주파수 echo 응답신호로부터 분수

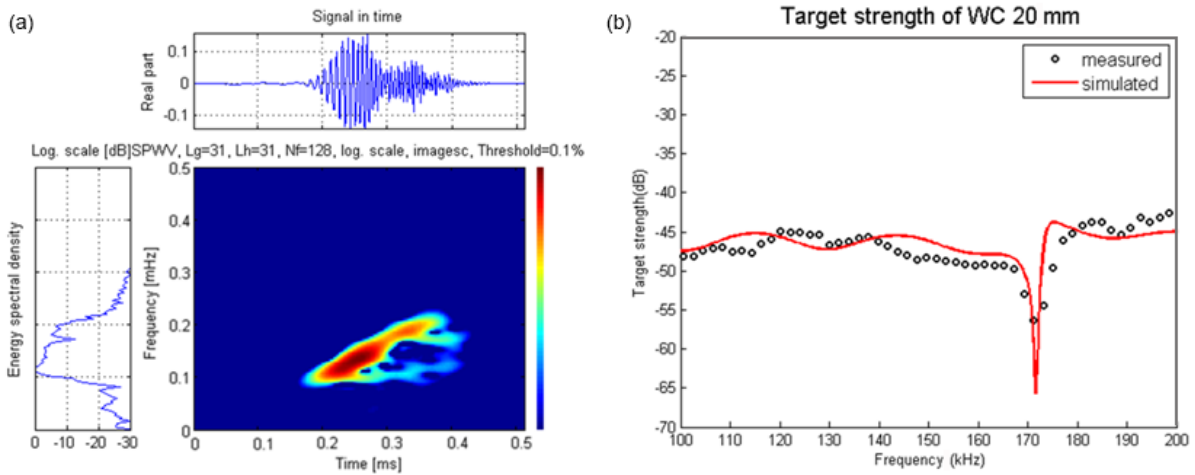


Fig. 2. Calibration results of the broadband echo sounder system for the frequency range of 100–200 kHz with a 20 mm WC sphere. The time-frequency response characteristic (a), and the measured and simulated target strength data (b) were indicated. WC, tungsten carbide.

차 푸리에 변환(fractional Fourier transform, FrFT)을 이용하여 경면 반사파를 분리, 추출한 다음, 경면 반사파 신호에 대한 반사강도의 주파수 의존성 패턴을 추정하여 분석, 고찰하였다(William et al., 1987; Blaska and Sedlacek, 2001; Cowell and Freear, 2010; Agounad et al., 2017; Lee, 2021)

결과 및 고찰

WC 교정구의 수치계산과 측정 반사강도의 주파수 의존성 패턴의 비교

현재, 단일 주파수(38, 70, 120, 200 kHz)에서 동작하는 소너 시스템의 음향학적 교정(Demer et al., 2015)에 사용되는 가장 작은 사이즈의 교정구는 직경 20 mm의 WC 교정구이다. 이 교정구에 대한 chirp 소너 시스템에 대한 반사강도의 주파수 의존성 패턴은 Fig. 2와 같다. Fig. 2a는 100–200 kHz의 chirp 펄스 신호의 주파수 대역에 대한 echo 신호의 시간-주파수 응답특성이다. 또한, Fig. 2b는 수치 시뮬레이션에 의한 WC 교정구의 이론 반사강도의 주파수 의존성 패턴(solid line)과 측정 반사강도의 주파수 의존성 패턴(circle)을 서로 비교, 분석한 것이다. Fig. 2의 시간-주파수 응답특성에는 시간 응답파형과 주파수 스펙트럼을 함께 나타내었고, 종축은 반사강도(dB)이고, 횡축은 주파수(kHz)이다. Fig. 2에서 1.96 kHz 간격으로 산출된 WC 교정구에 대한 측정 반사강도의 주파수 의존성 패턴을 살펴볼 때, 171.2 kHz에서 매우 깊은 null 응답, 즉, 경면 반사파와 원주 산란파 사이에 강한 상쇄간섭에 기인하는 공진현상이 발생하여 반사강도가 -56.27 dB까지 급격하게 저하하였다.

한편, 시뮬레이션에 의한 반사강도의 응답패턴에서는 측정 응답패턴과 같이 거의 같은 주파수 영역에서 매우 깊은 null 응답이 출현하였는데, 그 반사강도는 -65.72 dB이었다. Fig. 2에서

100–200 kHz의 주파수 대역에 대한 수치 시뮬레이션에 의한 평균반사강도와 측정반사강도의 평균 추정치 사이에는 약 0.5 dB의 차이가 있었다.

일반적으로 (1)식의 교정구의 형상함수 $f_{\infty}(\omega)$ 에 대한 null 응답의 출현 주파수 및 진폭 응답특성은 교정구의 횡 방향 음속에 따라 매우 민감하게 변동한다. 특히, Fig. 2에서와 같이 100–200 kHz의 chirp 펄스신호에 대한 교정구의 echo 응답특성은 각 주파수 성분에 대한 echo 신호의 경면 반사파와 원주 산란파 사이에 일어나는 간섭현상에 의해 급격하게 변동한다. 이 때, 주파수가 높을수록, 즉, 파장이 짧을수록 경면 반사파와 원주 산란파 사이에 나타나는 보강간섭과 상쇄간섭 패턴은 파장(주파수)과 교정구의 크기(직경), WC 재질에 따른 음속변화 등에 의해 복잡한 패턴으로 나타난다. 만일, 보강간섭이 위상차 0° 부근의 동위상(in-phase) 상태에서 발생하는 경우에는 원주 산란파가 긴 ringing tail로서 출현하게 되고, 위상차 180° 부근의 역위상(out of phase) 상태에서 간섭이 발생하면 형상함수의 진폭이 급격하게 저하하는 deep null의 공진현상이 발생한다. 또한, 송신 펄스신호의 펄스 폭이 교정구의 원주 선회경로에 상당하는 시간 보다 짧은 경우에는 경면 반사파와 원주 산란파의 분리, 식별이 가능하지만, 대부분의 소너 시스템에서 사용하는 송신 펄스신호의 펄스 폭은 교정구의 원주 선회시간보다 길기 때문에 원주 산란파는 경면 반사파의 후방에서 연속적으로 간섭현상을 일으키며 수신된다. Fig. 2에서 101.5 kHz와 168.5 kHz 부근에서는 경면 반사파 신호의 후방에서 일정한 시간만큼 지연되어 순차적으로 도래하는 원주 산란파 신호와 다중 내부파 신호(multiple internal wave)가 서로 동위상의 보강간섭현상을 일으켜 긴 꼬리모양으로 echo 성분이 매우 길게 출현하였다. 반면, 171.2 kHz 부근의 주파수에서는 경면 반사파 신호에 뒤이어 일정한 시간만큼 지연되어 도래하는 원주 산란파 신호와 다

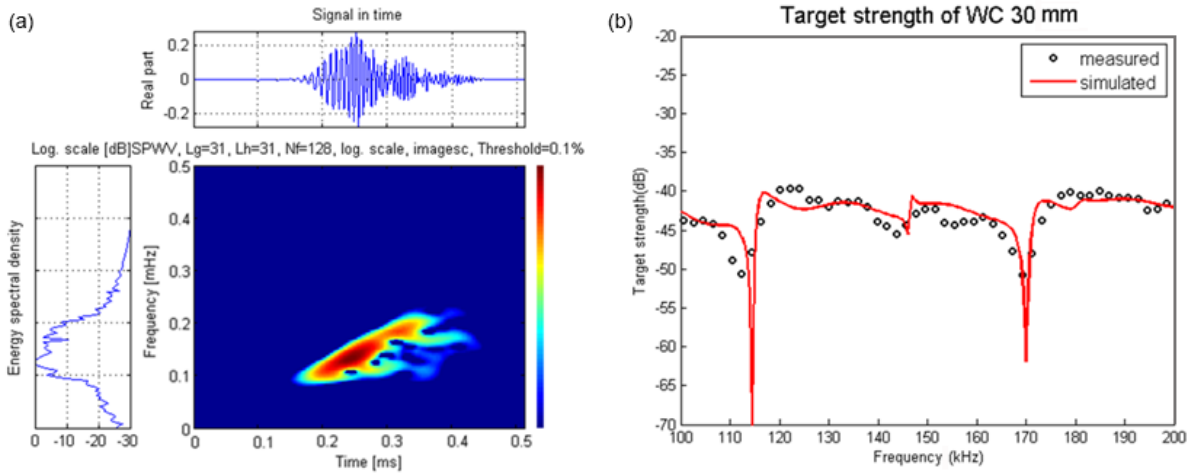


Fig. 3. Calibration results of the broadband echo sounder system for the frequency range of 100–200 kHz with a 30 mm WC sphere. The time-frequency response characteristic (a), and the measured and simulated target strength data (b) were indicated. WC, tungsten carbide.

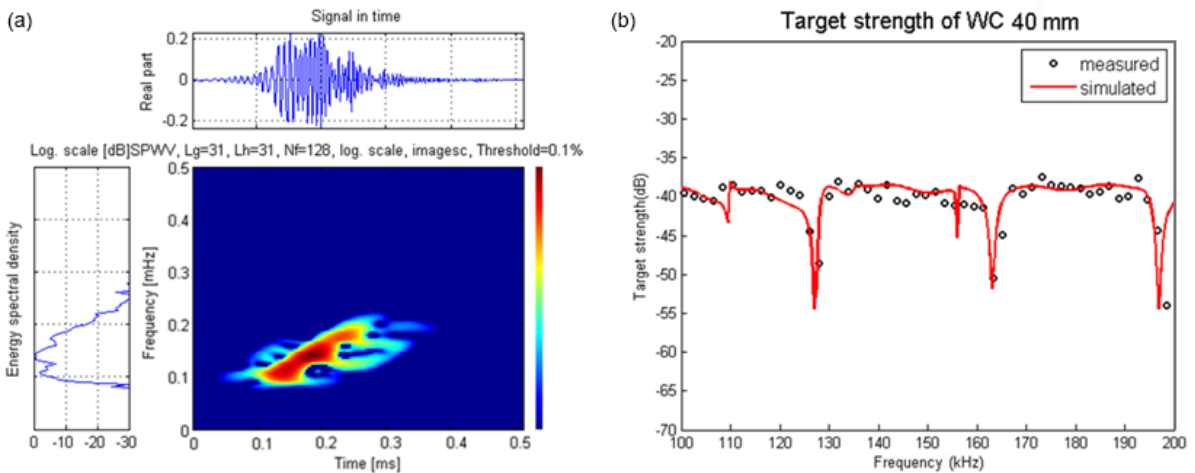


Fig. 4. Calibration results of the broadband echo sounder system for the frequency range of 100–200 kHz with a 40 mm WC sphere. The time-frequency response characteristic (a), and the measured and simulated target strength data (b) were indicated. WC, tungsten carbide.

중 내부파 신호가 서로 역위상의 상쇄간섭현상을 일으켜 echo 응답신호가 급격하게 소멸되어 deep null 진폭 패턴을 나타내었다. 또한, 약 169 kHz와 179 kHz 사이의 deep null 현상이 출현하는 주파수 범위 이외의 영역에서는 경면 반사파 신호에 뒤이어 연속적으로 도래하는 원주 산란파 신호와 다중 내부파 신호가 서로 랜덤 위상(random phase)의 간섭현상(incoherent interference)을 일으켜 이들 주파수 영역에서는 교정구의 공진 현상이 거의 출현하지 않았고, 주로 경면 반사파가 우세하게 나타나는 echo 응답특성을 나타내었다. 즉, WC 교정구를 사용하여 광대역 소너 시스템의 음향학적 교정을 수행하는 데 있어서는 교정구의 공진현상에 거의 영향을 받지 않는 경면 반사파에 대한 echo 응답특성을 이용하여야만, 소너 시스템의 정확한 교

정을 수행할 수 있음을 알 수 있었다. 이 때문에 사용 주파수 대역에 있어서 공진산란의 영향을 받지 않는 상태로서 송신과 수신 모드에 대한 합성 FOM 감도를 추정하기 위해서는 경면 반사파의 분리를 위한 신호처리, 또는, 공진산란에 기인하는 echo 응답성분을 제거하기 위한 신호처리가 수행되어야 한다.

한편, 직경 30 mm, 40 mm, 51 mm 및 60 mm의 WC 교정구에 대한 echo 신호의 반사 주파수 의존성 패턴은 각각 Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5 및 Fig. 6과 같다. Fig. 3–Fig. 6에서 a는 100–200 kHz의 주파수 대역에 대한 echo 신호의 시간-주파수 응답특성이다. 또한, b는 이론 반사강도의 주파수 의존성 패턴(solid line)과 측정 반사강도의 주파수 의존성 패턴(circle)을 서로 비교, 분석한 결과이다. 이들 그림의 시간-주파수 응답특성에는 시간 응

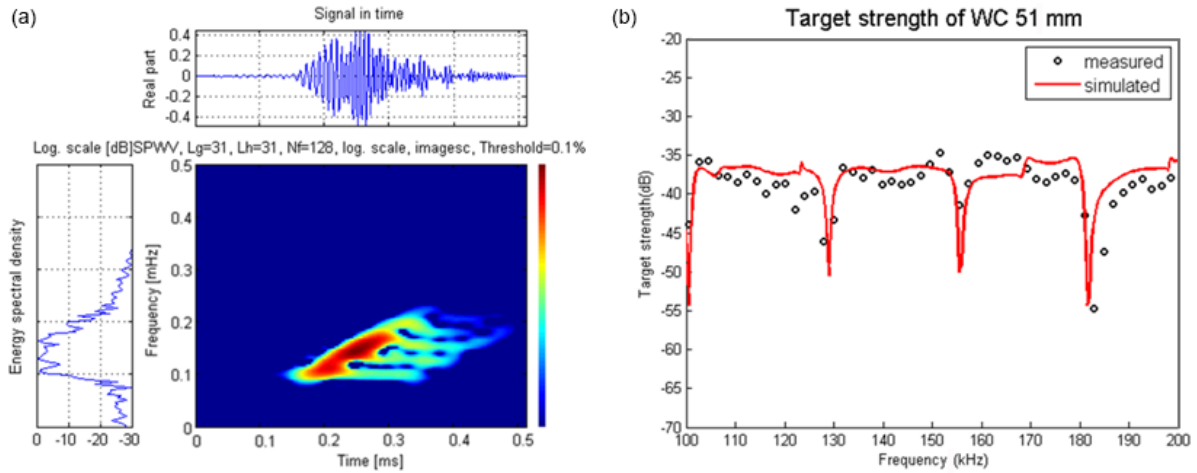


Fig. 5. Calibration results of the broadband echo sounder system for the frequency range of 100–200 kHz with a 51 mm WC sphere. The time-frequency response characteristic (a), and the measured and simulated target strength data (b) were indicated. WC, tungsten carbide.

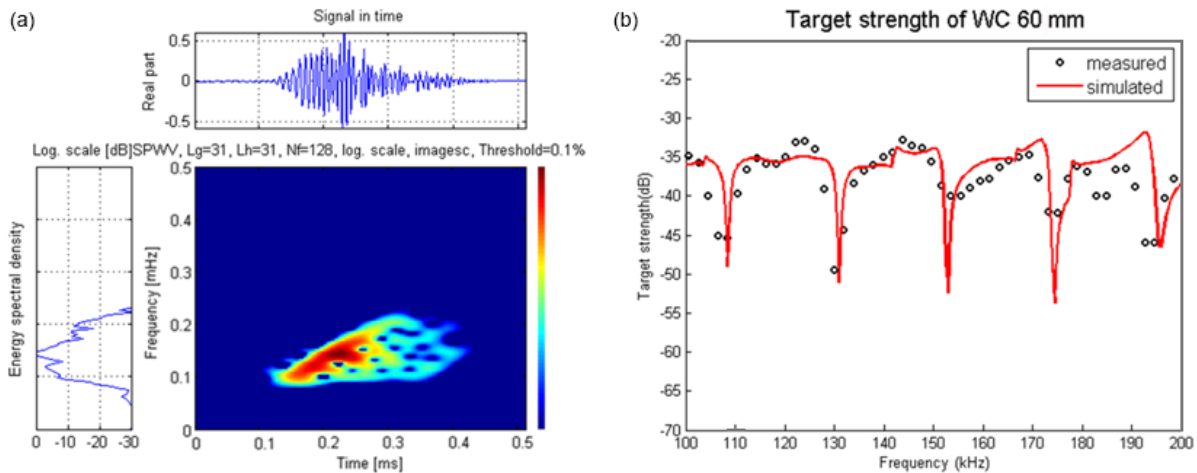


Fig. 6. Calibration results of the broadband echo sounder system for the frequency range of 100–200 kHz with a 60 mm WC sphere. The time-frequency response characteristic (a), and the measured and simulated target strength data (b) were indicated. WC, tungsten carbide.

답파형과 주파수 스펙트럼을 함께 나타내었고, 또한, 반사강도 패턴의 종축은 반사강도(dB)이고, 횡축은 주파수(kHz)이다. 먼저, 직경 30 mm, 40 mm, 51 mm 및 60 mm의 WC 교정구에 대한 측정 반사강도의 주파수 의존성 패턴을 살펴볼 때, 직경 30 mm의 경우에는 112.33 kHz와 169.20 kHz에서 deep null 응답 현상이 출현하였고, 이들 공진영역에 대한 측정반사강도는 각각 -50.67 dB과 -50.75 dB이었다. 또한, 직경 40 mm의 경우에는 128.02 kHz, 163.31 kHz, 198.61 kHz에서 deep null 응답 현상이 출현하였고, 이들 공진영역에 대한 측정반사강도는 각각 -48.61 dB, -50.42 dB, -54.03 dB이었다.

한편, 직경 51 mm의 경우에는 각각 100.57 kHz, 128.02 kHz, 155.47 kHz, 182.92 kHz에서 deep null 응답현상이 출

현하였고, 이들 공진영역에 대한 측정반사강도는 각각 -43.95 dB, -46.02 dB, -41.40 dB, -54.79 dB이었다. 본 연구에서 사용한 가장 큰 사이즈의 WC 교정구인 직경 60 mm의 경우에는 각각 108.41 kHz, 129.98 kHz, 155.47 kHz, 175.08 kHz, 192.73 kHz에서 deep null 응답현상이 출현하였고, 이들 공진영역에 대한 측정반사강도는 각각 -44.49 dB, -50.20 dB, -39.83 dB, -42.27 dB, -46.02 dB이었다. 즉, WC 교정구의 직경이 클수록 100–200 kHz의 주파수 대역에서 deep null 현상이 발생하는 공진 횟수 및 그 주파수 영역이 증가하기 때문에 이들 공진 산란현상을 고려하여 chirp 소너 시스템의 음향학적 교정에 사용할 최적의 WC 교정구를 선택하는 것이 매우 중요하다. 특히, 단일 주파수를 사용하는 소너 시스템에서는 사용 주파수 영역

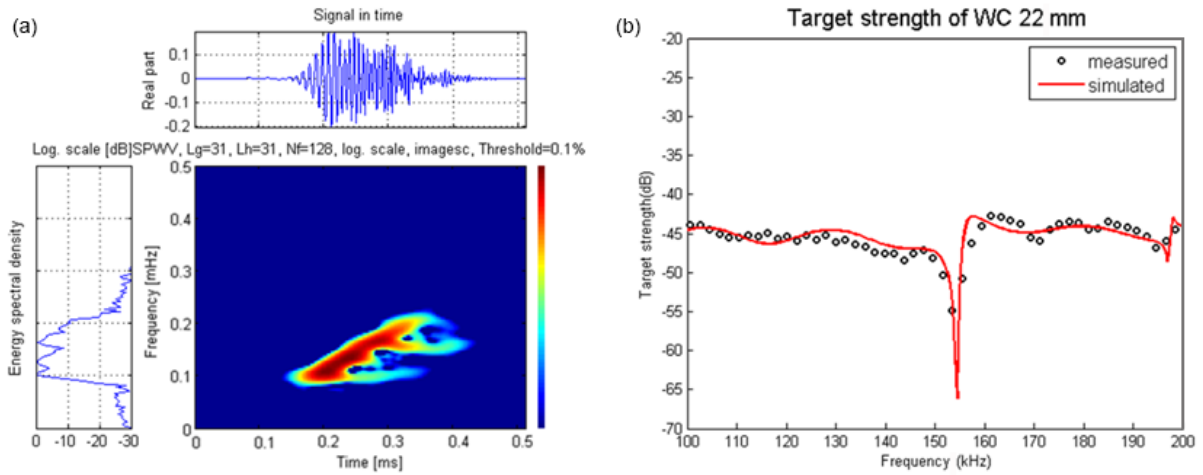


Fig. 7. Calibration results of the broadband echo sounder system for the frequency range of 100–200 kHz with a 22 mm WC sphere. The time-frequency response characteristic (a), and the measured and simulated target strength data (b) were indicated. WC, tungsten carbide.

에서 평탄한 반사강도 패턴을 갖는 WC 교정구를 선택할 필요가 있다. 또한, Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5 및 Fig. 6에 나타난 직경 30 mm, 40 mm, 51 mm 및 60 mm의 WC 교정구에 대한 100–200 kHz의 주파수 대역에서의 수치 시뮬레이션에 의한 평균반사강도와 측정반사강도의 평균 추정치 사이의 차는 각각 0.27 dB, 0.35 dB, 1.04 dB, 1.34 dB이었다. 즉, WC 교정구의 사이즈가 증가함에 따라 수치계산과 측정 반사강도 사이의 차가 증가하는 경향을 나타내었다.

한편, 직경 30 mm, 40 mm, 51 mm 및 60 mm의 WC 교정구에 대한 이론 반사강도의 deep null 현상에 대한 응답 주파수는 측정 반사강도의 deep null 응답 주파수와 거의 유사한 경향을 나타내었다. chirp 펄스 신호가 각각 직경 30 mm, 40 mm, 51 mm 및 60 mm의 WC 교정구에서 산란될 때, 경면 반사파, 원주 산란파 및 내부 반사파 성분들이 서로 보강간섭을 일으키는 주파수 영역에서는 공통적으로 원주 산란파와 내부 반사파 신호가 경면 반사파보다 지연되어 수신되는 time delay의 대소에 따라 긴 꼬리 모양의 부가적인 echo 신호가 매우 불규칙하게 관찰되었다. 또한, 이들 echo 성분들이 서로 상쇄간섭을 일으키는 주파수 영역에서는 echo 신호의 진폭이 급격하게 저하하는 deep null 현상이 공통적으로 출현하였다.

WC 교정구의 경면 반사파에 대한 반사강도의 주파수 의존성 추정

현재, 38–120 kHz의 주파수 대역에서 운용되는 소너 시스템의 음향학적 교정에 많이 사용되고 있는 직경 22 mm (Demer et al., 2015)의 WC 교정구에 대한 반사 주파수 의존성 패턴은 Fig. 7 및 Fig. 8과 같다. Fig. 7은 교정구로부터 산란되는 경면 반사파, 원주 산란파 및 내부 반사파 성분 등이 모두 포함된 echo 성분에 대한 반사강도 응답특성이고, Fig. 8은 이들 echo

응답성분 중에서 FrFT (fractional fourier transform) 기법에 의해 경면 반사파 성분만을 추출하여 유도한 반사강도 응답특성이다. Fig. 7과 Fig. 8의 좌측은 100–200 kHz의 chirp 펄스신호의 주파수 대역에 대한 echo 신호의 시간-주파수 응답특성으로서 시간 응답파형과 주파수 스펙트럼을 함께 나타내었다. 한편, Fig. 7과 Fig. 8의 우측은 수치 시뮬레이션에 의한 WC 교정구의 이론 반사강도(solid line)와 측정 반사강도의 주파수 의존성 패턴(circle)을 서로 비교, 분석한 것으로서, 종축은 반사강도 (dB)이고, 횡축은 주파수(kHz)이다.

Fig. 7에서 직경 22 mm의 WC 교정구에 대한 측정 반사강도의 주파수 의존성 패턴에서는 153.5 kHz에서 매우 깊은 null 응답, 즉, 경면 반사파, 원주 산란파 및 내부파 성분 사이에 강한 상쇄간섭이 발생하여 반사강도가 -54.84 dB까지 급격하게 저하하였다. 그러나, 공진산란이 발생하는 153.5 kHz로부터 완전히 벗어난 주파수 영역에서는 echo 생성에 기여하는 응답성분들이 random 위상으로 간섭하기 때문에 원주 산란파와 내부 반사파 성분이 서로 상쇄간섭을 일으켜 거의 소멸됨으로써 경면 반사파만이 echo 응답성분으로 남는 현상을 나타내었다. 이 경우에 대한 echo 파형은 입사파 파형과 거의 유사한 형상을 나타내었다. Fig. 7의 시간-주파수 패턴에서 알 수 있는 바와 같이 공진 주파수 영역에서는 echo 생성에 기여하는 응답성분들이 동위상, 또는, 역위상으로 간섭하는 현상이 관찰되었다. 즉, 원주 산란파와 내부 반사파의 합성신호가 다시 경면 반사파와 간섭을 일으킴으로써 경면 반사파 신호의 echo 진폭 및 형상패턴에 큰 변화가 나타났다. 이 때문에 echo 응답신호의 진폭이 급격하게 감소하는 deep null 현상, 또한, 경면 반사파 신호의 후방으로 매우 긴 꼬리 모양(ringing tail)의 echo 응답성분이 연이어 출현하는 echo 신호가 동시에 관찰되었다. 또한, Fig. 7에서 100–200 kHz의 주파수 대역에 대한 수치 시뮬레이션에 의

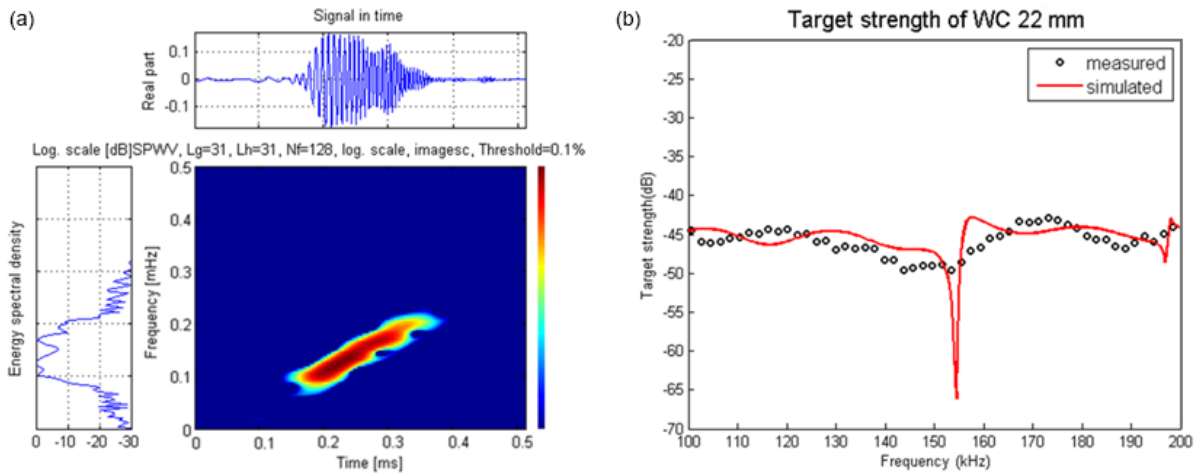


Fig. 8. Comparison of the simulated data (solid line) with the specular target strength values (white circle) for the frequency range of 100–200 kHz (b) estimated by extracting the specular wave from the front interface of a 22 mm WC sphere using the FrFT. Time-frequency response characteristic (a) was indicated. WC, tungsten carbide; FrFT, fractional Fourier transform.

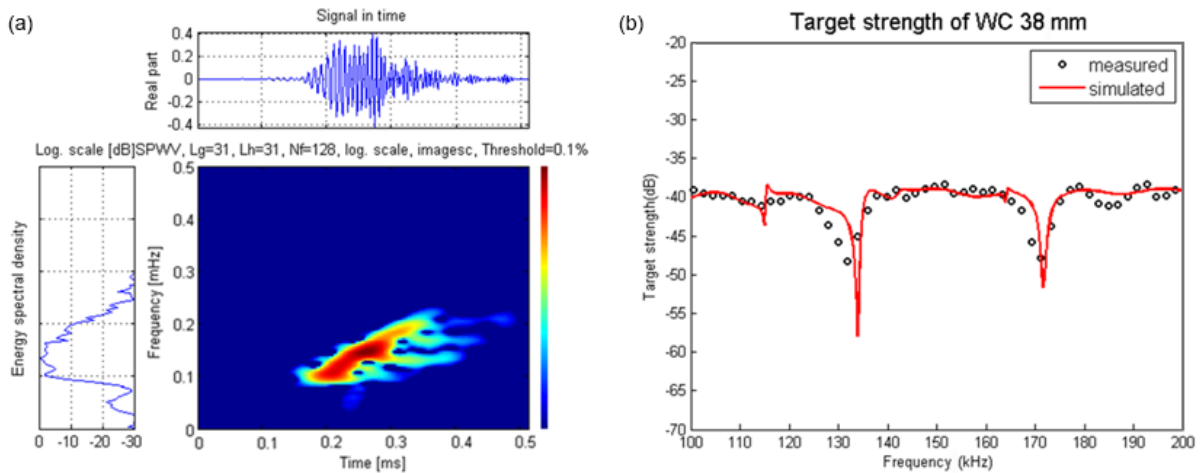


Fig. 9. Calibration results of the broadband echo sounder system for the frequency range of 100–200 kHz with a 38 mm WC sphere. The time-frequency response characteristic (a), and the measured and simulated target strength data (b) were indicated. WC, tungsten carbide.

한 평균반사강도와 측정반사강도의 평균 추정치 사이에는 약 0.15 dB의 차이가 있었다. 이 결과는 본 연구에 사용한 7개의 WC 교정구 가운데 수치계산 결과와 측정반사강도의 차이가 가장 작은 값이다.

본 연구에서는 이들 원주 산란파와 내부 반사파 성분이 교정구의 전면으로부터 산란되는 경면 반사파보다 항상 후방영역에 출현하는 점에 주목하여 이들 신호성분을 시간-주파수 영역에서 FrFT 기법을 이용하여 Fig. 8a에서와 같이 제거함으로써 경면 반사파 신호만을 추출하여 반사강도의 주파수 의존성 패턴을 분석하였는데, 그 결과는 Fig. 8b와 같다. Fig. 8에서 직경 22 mm의 WC 교정구에 대한 경면 반사파 신호만을 대상으로 추

정한 측정 반사강도의 주파수 의존성 패턴을 살펴볼 때, 153.5 kHz에서 반사강도가 -49.6 dB까지 상향 이동하는 현상이 나타났다. 이 결과를 Fig. 7과 비교해 보면, 공진 산란에 의해 초래되었던 deep null 현상과 이로 인한 진폭 저하현상이 완전히 보정되었음을 알 수 있었다. 이로써 본 연구에서 목적인 100–200 kHz의 주파수 대역에서 매우 완만한 반사강도의 주파수 의존성 패턴이 도출되었다. 이 결과로부터 100–200 kHz의 주파수 대역을 사용하는 chirp 소너 시스템에 대한 음향학적 교정에 직경 22 mm의 WC 교정구가 효율적으로 사용될 수 있음을 알 수 있었다. 한편, 18–200 kHz의 주파수 대역에 대한 소너 시스템의 음향학적 교정에 가장 많이 사용되고 있는 직경 38 mm

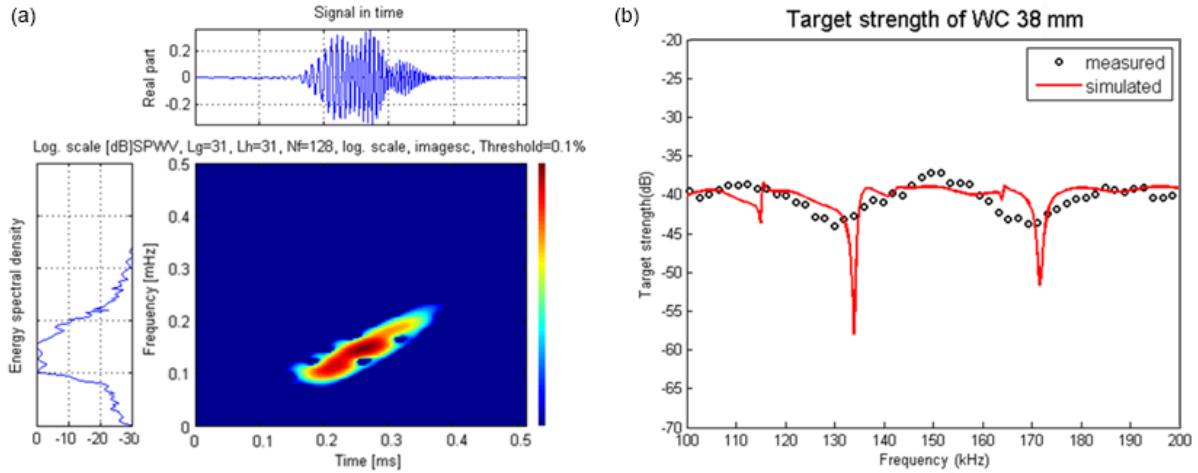


Fig. 10. Comparison of the simulated data (solid line) with the specular target strength values (white circle) for the frequency range of 100–200 kHz (b) estimated by extracting the specular wave from the front interface of a 38 mm WC sphere using the FrFT. The time-frequency response characteristic (a) was indicated. WC, tungsten carbide; FrFT, fractional Fourier transform.

(Demer et al., 2015)의 WC 교정구에 대한 반사 주파수 의존성 패턴은 Fig. 9 및 Fig. 10과 같다. Fig. 9는 교정구로부터 산란되는 경면 반사파, 원주 산란파 및 내부 반사파 등의 합성 echo 성분에 대한 반사강도 응답특성이다. 한편, Fig. 10은 이들 echo 응답성분 중에서 FrFT 기법에 의해 경면 반사파 성분만을 추출하여 유도한 반사강도 응답특성이다.

Fig. 9a과 Fig. 10a는 100–200 kHz의 chirp 펄스신호의 주파수 대역에 대한 echo 신호의 시간-주파수 응답특성으로서, 시간 응답파형과 주파수 스펙트럼을 함께 나타내었다. 또한, Fig. 9b와 Fig. 10b는 수치 시뮬레이션에 의한 WC 교정구의 이론 반사강도(solid line)와 측정 반사강도의 주파수 의존성 패턴(circle)을 서로 비교, 분석한 것으로서, 종축은 반사강도(dB)이고, 횡축은 주파수(kHz)이다.

먼저, Fig. 9a에 나타난 echo 응답신호의 시간-주파수 패턴을 살펴보면, 공진 산란이 나타나는 134.0 kHz와 171.5 kHz 부근의 주파수 대역에서는 echo 생성에 기여하는 원주 산란파와 내부 반사파의 간섭성분이 경면 반사파 신호와 다시 반복적으로 간섭을 일으킴으로써, echo 응답신호의 진폭이 급격하게 감소하는 deep null 현상을 나타내었다. 또한, 그 이외의 주파수 대역에서도 경면 반사파 신호의 후방으로 매우 긴 꼬리 모양의 echo 응답성분이 연이어 출현하였다. 또한, Fig. 9b에 나타난 WC 교정구의 이론 반사강도에 대한 주파수 의존성 패턴에 있어서는 134.0 kHz와 171.5 kHz에서 강한 공진산란현상이 출현하였다. 이들 공진영역에 대한 반사강도는 각각 -57.89 dB과 -51.68 dB로서 강한 deep null 응답특성이 관찰되었다. 한편, 측정 반사강도 패턴에서는 deep null 현상이 각각 131.94 kHz와 171.16 kHz에서 출현하였고, 그 반사강도는 -48.27 dB과 -47.79 dB로서, 수치계산의 결과와 비교할 때, 주파수와 반사강도 레벨 모

두 약간의 차이를 나타내었다. 또한, Fig. 9에서 100–200 kHz의 주파수 대역에 대한 수치 시뮬레이션에 의한 평균반사강도와 측정반사강도의 평균 추정치 사이에는 약 0.34 dB의 차이가 있었다.

한편, Fig. 10a에 나타난 시간-주파수 응답패턴은 FrFT 기법을 이용하여 Fig. 9a에 나타난 원주 산란파와 내부 반사파 성분이 포함된 시간-주파수 응답패턴으로부터 이들 두 echo 응답성분을 제거한 후, 교정구의 경면 반사파 신호성분만을 추출하여 얻은 시간-주파수 응답패턴이다. 또한, Fig. 10b는 Fig. 10a에 대한 경면 반사파 신호 성분만을 대상으로 추출한 반사강도의 주파수 의존성 패턴을 나타낸 결과이다. Fig. 10의 직경 38 mm의 WC 교정구에 대한 경면 반사파 신호에 대한 측정반사강도의 주파수 의존성 패턴을 살펴볼 때, deep null 현상이 출현하였던 131.94 kHz와 171.16 kHz에서의 반사강도가 각각 -44.81 dB, -43.70 dB까지 상향 이동하는 현상을 나타내었다. 이 결과를 Fig. 9와 비교해 보면, 공진 산란에 의해 초래되었던 deep null 현상과 이로 인한 진폭 저하현상이 완전히 보정되었음을 알 수 있었다. 이로써 본 연구에서 목적하는 직경 38 mm WC 교정구의 100–200 kHz의 주파수 대역에 대한 주파수 의존성 패턴이 매우 완만하게 보정되었음을 알 수 있다. 따라서, 직경 38 mm의 WC 교정구의 경면반사파 성분에 대한 반사강도의 주파수 의존성 패턴을 이용하여 chirp 소너 시스템에 대한 음향학적 교정을 수행하면, 어업생물의 현존 자원량을 추정할 때, 그 추정 결과에 대한 신뢰도가 더욱 향상될 것으로 판단된다.

현재, 어로 현장에서 소너 시스템을 사용하여 어족생물의 현존 자원량, 체장 조성, 어종의 식별 등과 같은 정보를 정량적으로 얻기 위해서는 사용하는 소너 시스템에 대한 음향학적 교정이 선행되어야 한다. 이 때, 가장 중요한 사항은 소너 시스템의

동작 주파수가 교정구의 공진 주파수 영역으로부터 완전히 벗어난 평탄 주파수 영역에 위치하도록 최적의 물리특성을 갖는 교정구를 선택하는 문제이다. 일반적으로 단일 주파수에서 동작하는 소너 시스템에서는 현재까지도 이 점에 주목하여 WC 교정구를 사용한 음향학적 교정이 수행되고 있다. 그러나, 최근 어로현장에 보급되기 시작한 광대역 소너 시스템에 있어서는 그 사용 주파수 대역이 수 십 kHz에 이르기 때문에 어떤 WC 교정구를 이용하더라도 chirp 소너 시스템의 사용 주파수 대역에서 평탄 echo 응답특성을 얻을 수 없는 문제가 발생한다. 본 연구에서는 FrFT 기법을 이용하여 교정구의 공진산란에 기인하는 영향을 받지 않는 경면 반사파를 추출하여 광대역 소너 시스템의 음향학적 교정을 수행하는 기법을 제시하였다. 이 교정 기법은 현재 세계적으로 널리 보급되고 있는 chirp 소너 시스템의 음향학적 교정을 정량적으로 수행하는데 있어 크게 기여할 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2021학년도 부경대학교 연구년[I] 교수 지원사업에 의하여 연구되었음.

References

- Agounad A, Assif EH, Khandouch Y, Maze C and Decultot D. 2017. Investigation into the bistatic evolution of the acoustic scattering from a cylindrical shell using time-frequency analysis. *J Sound Vib* 412, 148-165. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.09.036>.
- Atkins PR, Francis D and Foote KG. 2008. Calibration of broadband sonar systems using multiple standard targets. *J Acoust Soc Am* 123, 3436-3436. <https://doi.org/10.1121/1.2934223>.
- Blaska J and Sedlacek M. 2001. Use of the intergral transforms for estimation of instantaneous frequency. *Meas Sci Rev* 1, 169-172.
- Chu D and Stanton TK. 1998. Application of pulse compression technique to broadband acoustic scattering by live individual zooplankton. *J Acoust Soc Am* 104, 39-55. <https://doi.org/10.1121/1.424056>.
- Cowell DMJ and Freear S. 2010. Separation of overlapping linear frequency modulated (LFM) signals using the fractional Fourier transform. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control* 57, 2324-2333. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2010.1693>.
- Demer DA, Berger L, Bernasconi M, Bethke E, Boswell K, Chu D, Domokos R, Dunford A, Fassler S, Gauthier S, Hufnagle LT, Jech JM, Bouffant N, Lebourges-Dhaussy A, Lurton X, Macaulay GJ, Perrot Y, Ryan T, Parker-Stetter S, Stienessen S, Weber T and Williamson N. 2015. Calibration of acoustic instruments. ICES Cooperative Research Report 326, 1-133.
- Dong Y and Cui Y. 2012. Analysis of a new joint time-frequency distribution of suppressing cross-term. *Res J Appl Sci Eng Technol* 4, 1580-1584.
- Foote KG. 1984. Comparison of copper and tungsten carbide calibration spheres. *J Acoust Soc Am* 75, 612-616. <https://doi.org/10.1121/1.390489>.
- Imberger J and Boashash B. 1986. Application of the Wigner-Ville distribution to temperature gradient microstructure: A new technique to study small-scale variations. *J Phys Oceanogr* 16, 1997-2012. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1986\)016%3C1997:AOTWDT%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1986)016%3C1997:AOTWDT%3E2.0.CO;2).
- Lavery AC, Bassett C, Lawson G and Jech JM. 2017. Exploiting signal processing approaches for broadband echosounders. *ICES J Mar Sci* 74, 2262-2275. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsx155>.
- Lee DJ, Kang HY and Kwak MS. 2015. Analysis and classification of broadband acoustic echoes from individual live fish using the pulse compression technique. *Korean J Fish Aquat Sci* 48, 207-220. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2015.0207>.
- Lee DJ. 2022. Separation of spectrally overlapped broadband acoustic scattering signals from Japanese needlefish *Hypohamphus sajori* using the fractional Fourier transform. *Korean J Fish Aquat Sci* 55, 195-206. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2022.0195>.
- MacLennan DN. 1981. The theory of solid spheres as sonar calibration targets. *Scottish Fisheries Research* 22, Department of Agriculture and Fisheries for Scotland, Aberdeen, U.K., 1-17.
- MacLennan DN and Dunn JR. 1984. Estimation of sound velocities from resonance measurements on tungsten carbide calibration spheres. *J Sound Vib* 97, 321-331. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(84\)90325-0](https://doi.org/10.1016/0022-460X(84)90325-0).
- Nesse TL, Hobak H and Korneliussen RJ. 2009. Measurements of acoustic-scattering spectra from the whole and parts of Atlantic mackerel. *ICES J Mar Sci* 66, 1169-1175. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsp087>.
- Shui PL, Shang HY and Zhao YB. 2007. Instantaneous frequency estimation based on directionally smoothed pseudo-Wegner-Ville distribution bank. *IET Radar Sonar Navig* 1, 317-325. <https://doi.org/10.1049/rsn:20060123>.
- Simmons EJ, Armstrong F and Copland PJ. 1996. Species identification using wideband backscattering 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, Ames, IA, U.S.A., 70-126.
- Stanton TK and Chu D. 2008. Calibration of broadband active acoustic systems using a single standard spherical target. *J Acoust Soc Am* 124, 128-136. <https://doi.org/10.1121/1.2917387>.
- Stanton TK, Chu D, Jech JM and Irish JD. 2010. New broadband methods for resonance classification and high-reso-

lution imagery of fish with swimbladders using a modified commercial broadband echosounder. *ICES J Mar Sci* 67, 365-378. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsp262>.

William EH, Numrich SK and Uberall H. 1987. Complex-frequency poles of the acoustic scattering amplitude, and their ringing. *IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Contr* 34, 22-28. <https://doi.org/10.1109/T-UFFC.1987.26907>.