# 분수차 푸리에 변환을 이용한 스펙트럼상에서 중첩된 학공치(Hypohamphus sajori)의 광대역 음향산란신호의 분리

이대재\*

부경대학교 해양생산시스템관리학부

## Separation of Spectrally Overlapped Broadband Acoustic Scattering Signals from Japanese Needlefish Hypohamphus sajori Using the **Fractional Fourier Transform**

Dae-Jae Lee\*

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

The separation of spectrally overlapped broadband echo signals from free-swimming Japanese needlefish Hypohamphus sajori using the fractional Fourier transform (FrFT) was investigated. The broadband echo signals were measured over frequency ranges of 40-80 and 110-220 kHz. The overlapped echo signals were separated after eliminating noise signals in the smoothed pseudo-Wigner-Ville distribution domain. The echo signal from a 40 mm WC sphere suspended just below a chirp transducer was used to calibrate the broadband of the chirp echo sounder and estimate the frequency dependence of target strength for the separated echo signals. The experimental results show that the proposed FrFT method can analyze the time-frequency image of broadband echo signals from free-swimming individual fish effectively and can be used as a quantitative tool for extracting the acoustic features used for fish species identification.

Keywords: Broadband echoes, Time-frequency filtering technique, Hypohamphus sajori target strength, Signal separation, Image denoising

#### 서 론

어로현장에서 음향을 이용하여 어족생물의 어종을 식별하는 것은 매우 어려운 문제중의 하나이다. 이 때문에 많은 연구자들 은 어떤 특정의 주파수에 대한 echogram의 패턴으로부터 어종 의 특징적인 식별정보를 추출하거나(Robotham et al., 2010), 또는, 매우 낮은 주파수를 이용하여 어군으로부터의 공진산란 을 측정함으로써 대상어군을 식별하려는 연구를 수행하여 왔다 (Stanton et al., 2010; Stanton et al., 2012). 최근에는 잘 제어된 실험환경에서 여러 어종의 활어 개체어로부터 수록한 시간-주 파수 이미지 패턴의 인공신경망 분석을 통해 어종을 식별하려 는 연구도 수행된 바 있다(Lee, 2016). 일반적으로 어족생물로 부터의 음향 echo 신호는 어체의 형상과 구조, 내부 생체조직

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

E-mail address: daejael@pknu.ac.kr

(cc)

This is an Open Access article distributed under the terms of • the Creative Commons Attribution Non-Commercial License BY NC (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.

등과 같은 해부학적 특징, 또한, 유영습성 등에 기인하는 부레 의 체적 및 형상변화 등과 같은 생태학적인 특징에 기인하여 매 우 불규칙하게 변동한다(Foote, 1980; Clay and Horne, 1994; Fassler et al., 2009; Neese et al., 2009; Lee, 2015b). 이 때문 에 현장에서 수록되는 미지의 어족생물에 대한 echo 신호로부 터 어종 고유의 특징적인 식별인자를 추출하는 데에는 아직 규 명되어야 할 많은 문제들이 있다. 먼저, 어종 고유의 식별정보 를 얻기 위해서는 가능한 한 넓은 주파수 대역에서 음향학적 정 보를 측정하기 위한 광대역 어군탐지시스템이 필요하다(Lee, 2014, 2018; Lee et al., 2014, 2015). 이와 같은 광대역 어군탐지 시스템을 이용하여 다수의 개체어에 대한 echo 신호를 정량적 으로 수록하면, 2차원, 또는, 3차원의 시간-주파수 echo 이미지 패턴을 추출할 수 있다. 따라서, 이들 이미지 패턴에 대한 데이

#### https://doi.org/10.5657/KFAS.2022.0195 Korean J Fish Aquat Sci 55(2), 195-206, April 2022 Received 7 February 2022; Revised 22 February 2022; Accepted 23 February 2022 저자 직위: 이대재(교수)

터 베이스를 작성한 후, 인공신경망에 의한 학습을 통해 미지의 어족생물로부터 수록된 시간-주파수 echo 이미지에 대한 유사 성을 판별하면, 탐지 어류의 어종을 식별할 수 있다(Lee, 2015a, 2016; Lee et al., 2016). 그러나, 실제의 어로 현장에 있어서는 chirp (compressed high intensity radar pulse) 어군탐지시스템 의 대역폭이 넓은 만큼 해중 잡음의 혼입이 증가하고, 또한, 각 주파수 대역에 대한 echo 신호 상호간에 간섭이 발생한다. 해중 에서 대부분의 어족생물은 일정한 형태의 군을 형성하여 유영 하는 습성이 있다. 따라서, 각 개체어 고유의 특징적인 음향학적 정보를 토대로 어종을 식별하는 경우에는 어로 현장에서 수록 되는 어군 echo 신호로부터 개체어 고유의 신호성분만을 효과 적으로 추출하기 위한 기법의 개발이 필요하다. 즉, 어군 echo 신호 속에 포함되어 있는 잡음성분의 denoising 기법과 개체어 신호성분의 추출기법의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 연안역의 표층에서 무리를 지어 서식하는 학 공치 어군으로부터 수록한 광대역 echo 신호를 대상으로 분수 차 푸리에 변환(fractional Fourier transform, FrFT)을 이용하 여 잡음성분을 제거한 후, 어군 echo 신호의 시간-주파수 이미 지 패턴으로부터 각 개체어의 echo image 성분을 분리, 추출하 는 연구를 수행하였다.

#### 재료 및 방법

#### 실험장치의 구성 및 음향학적 조사

본 연구는 2016년 1월 및 2월에 부산 남구 수영만에서 Lee (2018)가 설계, 개발한 chirp 데이터 수록 및 처리 시스템(chirp 소너 시스템)을 사용하여 수행하였다. 실험장치는 chirp echo 송·수신 시스템, 노트북 PC (Dell Inspirion, Round Rock, TX, USA), 2개의 chirp 음향변환기(B265LH; Airmar technology corporation, Milford, NH, USA), 디지털 스토리지 오실로스 코프(Model DS-1530; EZ, Gwangju, Korea), 전치증폭기 (Model VP-2000; Reson, Slangerup, Denmark), USB 외장형 하드 디스크(P3 Portable USB 3.0 1TB; Samsung, Seoul, Korea), LED (light emitting diode) 수중 집어등(Model YF-500; Hapyson, Tokyo, Japan) 등으로 구성하였다. 실험은 수영만 용 호 부두에 접안중인 부경대학교 실습선 가야호(G/T 1.737톤) 의 선상에서 chirp 음향변환기를 해면하 약 1.0 m 수심에, 또한, LED 수중 집어등을 음향변환기 인근의 약 2.0 m 수심에 각각 설치한 후, 수행하였다. 이때, chirp 소너 시스템에 탐지되는 어 족생물의 어종은 손 낚시에 의해 샘플링한 어획물로부터 식별 하였다. 2016년 2월 14일에 현장실험 당시(14:00-21:00) 수영 만 용호 부두의 수심은 약 7 m, 기상은 매우 평온하였으며, 일 몰은 18:04이었다.

실험은 먼저 chirp 소너 시스템에 접속된 2개의 chirp 송·수파 기(B265LH) 중에서 1 개를 사용하여 펄스 폭 1.0 ms, 주파수 대역폭 20-220 kHz의 chirp 펄스신호를 해중으로 송출하였다. 한편, 다른 1개(B265LH)의 음향변환기는 저주파 채널(40-80 kHz)과 고주파 채널(110-220 kHz)의 echo 신호를 동시에 수신 하는데 사용하였다. 이 때, 각 채널을 통해 수신되는 echo 신호 는 전치 증폭기, TVG (time varied gain) 증폭기, 대역 필터 등 을 거쳐 A/D 변환기에서 500 kHz (저주파 채널), 또는, 1 MHz (고주파 채널)의 샘플링 주파수로서 양자화한 후, 하드 디스크에 수록하였다. chirp 소너 시스템의 교정은 LED 수중 집어등을 소등한 상태에서 직경 40 mm의 텅스텐 교정구[tungsten carbide sphere with 6% cobalt binder (WC)]를 해중으로 매우 천 천히 내리면서 echo 응답특성을 연속적으로 수록한 후, 이들 응 답신호를 이용하여 수행하였다. 반면, 어군 echo 신호의 수록은 LED 수중 집어등을 점등한 상태에서 학공치 어군을 송·수파기 의 음속 빔내로 유집한 상태에서 수행하였다.

한편, 현장에서 손 낚시에 의해 샘플링한 학공치에 대해서는 체장, 체중 등과 같은 생물학적 요소를 측정한 후, 실험실로 옮 겨 투명 아크릴 수조(L×B×D, 1.8×1.2×1.2 m)에서 음향반 사강도를 측정하였다. 즉, 실험수조에서는 학공치의 등방향에 대한 반사강도의 자세각 및 주파수 의존성을 측정하였다. 이 때, 각 자세각에 대한 echo 신호는 대역 필터와 전치증폭기를 경 유하여 수신하고, 디지털 오실로스코프(Model DS-1530; EZ, Gwangju, Korea) 및 스펙트럼 분석기(Model LSA-30; LIG Nex1, Yongin, Korea)를 사용하여 반사강도를 분석함과 동시 에, 이들 실험 결과를 USB 메모리에 수록하였다.

Echo 이미지의 잡음제거 및 스펙트럼상에서 중첩된 개 체어 echo 신호의 분리

FrFT를 이용하여 어군 echo 신호 속에 혼입되어 있는 잡음신 호를 제거한 후, 이들 어군 echo 신호로부터 각 개체어에 대한 시간-주파수 echo image 성분만을 분리, 추출하는 기법을 나타 낸 모식도는 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 각 어군으로부터 수록한 echo 신호에 대한 시간-주파수 이미지는 SPWVD (smoothed pseudo-Wigner-Ville distribution) 기법을 이용하여 추출하였 다.

chirp 소너 시스템으로부터 수록된 어족생물에 대한 echo 신 호 *f*(*t*)의 푸리에 변환(Fourier transform)과 그 역변환(inverse Fourier transform)은 다음 식과 같이 정의된다.

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad \dots \qquad (1)$$

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{-j\omega t} d\omega \quad \dots \qquad (2)$$

또한, chirp echo 신호 f(t)의 p차 FrFT을  $F^{\alpha}(u)$ 라 할 때, 이 변환은



Fig. 1. Diagram illustrating the separation of spectrally overlapped broadband acoustic scattering signals and the TF image denoising using the FrFT. The echo signals from each individual fish were extracted by rotating the SPWVD image of two overlapped chirp echo signals by the angle  $\alpha_{rev}$  using the FrFT. TF, time-frequency; FrFT, fractional Fourier transform; SPWVD, smoothed pseudo-Wigner-Ville distribution.

$$F^{\alpha}(u) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1-j\cot\alpha}{2\pi}} e^{j\frac{u^{2}\cot\alpha}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\frac{t^{2}}{2}\cot\alpha} e^{-jut\csc\alpha} f(t)dt, \\ \text{if } \alpha \neq N\pi, \text{ N is integer} \\ f(u), \\ \text{if } \alpha = 2N\pi, \text{ N is integer} \\ f(-u), \\ \text{if } \alpha = (2N+1)\pi, \text{ N is integer} \end{cases}$$

에 의해 정의된다(Namias, 1980; Ozaktas and Mendlovic, 1993; Xia, 1996; Narayanan and Prabhu, 2003). 여기서, α와 *p* 사이에는 *p*=2α/π의 관계가 성립한다. FrFT기법은 푸리에 변 환의 일반형으로서, (3)식에 대한 *F*<sup>α</sup>(*u*)의 α값을 적정하게 선택 함에 따라 (1)식의 푸리에 변환의 주파수 영역이나, (2)식의 시 간 영역의 어느 영역에도 속하지 않는 fractional 영역에 대한 이 미지를 얻을 수 있다. 따라서, 이 기법을 이용하면 chirp echo 이미지 패턴에 출현하는 잡음성분을 효과적으로 제거할 수 있 고, 또한, 중첩된 개체어의 echo 신호도 정량적으로 분리, 추출 할 수 있다. 본 연구에서는 FrFT 기법을 통해 이미지 패턴상에 나타나는 잡음을 먼저 제거한 후, 어군 echo 신호로부터 개체어 의 이미지 패턴을 분리하였다. 또한, 이들 신호를 대상으로 반 사강도의 주파수 의존성 등과 같은 어종식별정보도 함께 추출 하였다.

해중에 분포하는 어군으로부터 chirp 펄스신호가 산란될 때, 각 개체어로부터 생성된 chirp echo 신호는 시간 및 주파수 영

역에서 서로 보강 및 상쇄 간섭과정을 거쳐 합성되고, 이들 신 호는 다시 해중 잡음이 혼입되어 수신된다. 이 때문에 어군으로 부터 수록한 chirp echo 신호로부터 각 어족생물을 구성하는 개 체어에 대한 echo 성분만을 분리, 식별하기 위해서는 해중의 잡 음신호를 먼저 제거하여야 한다. 이 때, 잡음신호가 제거된 어 군의 다중 echo 신호(multiple echo signal)는 각 개체어의 신호 성분이 시간 및 주파수 영역에서 서로 중첩되어 있는 관계로 시 간 영역만의, 또는, 주파수 영역만의 필터링 기술로서는 이들 echo 성분을 서로 분리, 식별할 수 없다. 따라서, 시간과 주파수 의 두 영역에서 적용 가능한 필터링 기술이 필요한데, 본 연구에 서는 FrFT기법을 이용한 시간-주파수 필터링 및 신호분해 기술 을 응용하여 이 문제를 해결하였다. 이를 위해 먼저, FrFT 기법 을 사용하여 시간-주파수 이미지를 시간 축, 또는, 주파수 축에 대하여 어떤 각도로 회전시켜 두 축 사이의 영역으로 투영시켰 다. 이때, α차 FrFT는 시간 축, 또는, 주파수 축에 대한 이미지를 반시계 방향으로 α 만큼 회전시키는 변환이고, -α차 FrFT는 α 차 FrFT의 역 변환, 즉, 반시계 방향으로 변환된 이미지를 다시 시계 방향으로 α 만큼 회전시키는 변환이다(Lohmann, 1993).

#### 최적 변환차수의 추정

본 연구에서는 chirp 소너 시스템의 FPGA 모듈(Spartan-3E FPGA 1200K; Xilinx, San Jose, CA, USA)을 통해 (4)식으로 정의되는 chirp 펄스신호를 발생 및 증폭시켜 chirp 송·수파기 에 공급하였다(Cowell and Freear, 2010).

$$s(t) = e^{j2\pi (at^2 + f_0 t + c)}$$
 .....(4)

이 식에서 2at+fo는 순간 주파수(instantaneous frequency)이 고, f 는 chirp 신호성분의 시작 주파수이다. 또한, 이 식으로부 터 송신 chirp 펄스 신호의 chirp rate, 즉, 시간에 따른 주파수 변 화의 기울기는 2a가 된다. Fig. 1에 나타낸 FrFT 기법을 이용하 여 먼저 잡음신호를 제거하기 위해서는 시간-주파수 공간에 출 현하는 어군 echo 이미지(chirp rate 2a)를 시간 축, 또는, 주파수 축과 평행하게 시계방향, 또는, 반시계 방향으로 회전시켜야 한 다. 본 연구에서는 어군 echo 이미지를 시간 축과 평행하게 회전 시킨 후, 그 echo 이미지가 위치하는 주파수 구간을 설정하여 목 적하는 이미지만을 분리, 추출하는 기법을 통해 잡음신호를 제 거하였다. 그 후, 어군 echo 이미지를 다시 반시계 방향으로 역 회전시켜 원래의 시간-주파수 영역으로 환원시켰다. 이 과정을 통해 얻어진 스펙트럼상에서 중첩된 어군 echo 이미지에 대한 FrFT 처리를 반복 수행하여 각 개체어에 대한 echo 이미지를 분 리, 추출하여 반사강도의 주파수 의존성 등을 분석하였다. 이와 같은 echo 이미지의 회전을 위해서는 최적의 FrFT 차수 α,,,를 구해야 하는데, 이 값은 (5)식에 의해 추출하였다.

어족생물로부터 수신된 echo 신호 f(t)의 p차 FrFT  $F^{\alpha}(u)$ 에 서  $\alpha$ 는 회전각으로서,  $\alpha = \frac{p\pi}{2}$ 에 의해 산출되는데, 본 연구에 서 *p* 값은 0<|α|<π의 범위에 대해서만 사용하였다. 즉, FrFT F<sup>α</sup>(u)에서 p=1, 즉, α=π/2일 때의 FrFT는 (1)식의 f(t)의 표 준 푸리에 변환(주파수 영역)을 의미하고, p=0, 즉, α=0일 때 의 FrFT는 echo 신호 f(t) 함수 자신(시간영역)을 의미한다. 또 한, p=-1, 즉, α=-π/2일 때의 FrFT는 (2)식의 푸리에 역변환 과 같다. 이와 같은 성질을 이용하면 시간 영역 신호 [f(t)], 또 는 주파수 영역 신호 [F(w)]를 시간과 주파수 사이의 영역 신호 로 변환시킬 수 있다. 이 때, 그 변환특성은 파라미터 p에 의존 하는 시간-주파수 평면상에서의 회전각 α에 의해 결정된다. 만 약, chirp 소너 시스템으로부터 수신되는 어군 echo 신호의 샘 플링 시간 폭을 Δt, 샘플링 주파수를 f<sub>s</sub>(=1/Δt), 데이터의 샘플 링 수를 N이라 하면, 샘플링 주파수 대역폭은 △f=f,/N이 된 다. 따라서, 샘플링 시간 폭에 대한 샘플링 주파수 대역폭의 비 는  $\Delta f / \Delta t = f_a^2 / N$ 이 되므로, (5)식은 (6)식과 같이 표시된다.

본 연구에서는 (6)식을 이용하여 최적의 변환차수  $\alpha_{opt}$ 를 구하였다.

#### 학공치에 대한 음향산란강도의 주파수 의존성 추정

본 연구에서는 학공치로부터 수록한 chirp echo 신호중에서 각 개체어들의 echo 성분들이 주파수 영역에서 서로 중첩되는 echo 신호만을 대상으로 이들 각 개체어의 echo 신호성분을 분 리, 추출하였는데, 그 음향산란강도의 주파수 의존성은 (7)식에 의해 구하였다.

$$TS_{\text{fish}} = 20 \log_{10} \left[ \frac{R_{\text{wc}}}{2 r_0} \cdot f_{\text{wc}} \cdot \frac{V_{\text{fish}}}{V_{\text{wc}}} \right] \quad \dots \dots \quad (7)$$

여기서,  $TS_{\text{fish}}$ 는 어류의 음향산란강도,  $R_{\text{wc}}$ 는 표준구(WC 40 mm)의 반경,  $r_0$ 는 송·수파기로부터 표준구까지의 거리( $r_0$ =1 m),  $f_{\text{wc}}$ 는 표준구의 형상함수,  $V_{\text{fish}}$ 와  $V_{\text{wc}}$ 는 각각 어류와 표준 구로부터의 echo 응답신호이다.

한편, (7)식을 주파수 영역에 대한 음향산란강도의 관계식으 로 확장하면,

$$TS_{\text{fish}}(f) = 20 \log_{10} \left[ \frac{R_{\text{wc}}}{2 r_0} \cdot f_{\text{wc}}(f) \cdot \left| \frac{E_{\text{fish}}(f)}{E_{\text{wc}}(f)} \right| \right] \cdots (8)$$

이 되고, 여기서,  $E_{fish}(f)$ 와  $E_{wc}(f)$ 는 각각  $V_{fish}(t)$ 와  $V_{wc}(t)$ 의 푸 리에 변환이고, t와 f는 각각 시간과 주파수이다. 본 연구에서 는 (8)식을 이용하여 학공치에 대한 음향산란강도의 주파수 의 존성을 구하였다.

#### 결과 및 고찰

어군의 chirp echo 응답특성 및 어획에 의한 어종식별

부산 수영만 용호부두에 접안, 계류중인 부경대학교 실습선 가야호에서 Lee (2018)가 개발한 chirp 소너 시스템을 사용하 여 수록한 echogram의 일례는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 수심 약 1 m 깊이에 출현하는 echo 신호는 수중 집어등에 의한 응답



Fig. 2. Scattered individuals and aggregations of Japanese needlefish *Hypohamphus sajori* freely swimming just below the broadband transducer of chirp sonar system. The LED underwater light was used to attract fish just below the chirp transducer, and the pole and line fishing was conducted to catch the fish swimming in shoals. LED, light emitting diode.



Fig. 3. A photograph of the Japanese needlefishes *Hypohamphus sajori*, that has a very unique figure because their chin is longer than their nose, caught with pole and line in the water column near the surface just below the chirp transducer.



Fig. 4. Depth dependence of the broadband eco signal from a 40 mm WC sphere suspended just below the transducer to provide the real-time calibration of the backscattered echoes from free-swimming needlefish. WC, tungsten carbide.



Fig. 5. a, TF image of the broadband echo signal, but overlaps perfectly the noise signal in the frequency domain, from a 40 mm WC sphere suspended just below the chirp transducer operating over the range of 110–220 kHz. b, TF image before denoising rotated by 22.5° in the clockwise direction using FrFT such that their frequency components for echo and noise signals do not overlap in the frequency domain. c, TF image after denoising. d, Reconstructed TF image of the echo signal rotated by 22.5° in the counterclockwise direction using FrFT after denoising. TF, time-frequency; WC, tungsten carbide; FrFT, fractional Fourier transform.



Fig. 6. TF image of the broadband echo signal from a 40 mm WC sphere suspended just below the chirp transducer operating over the range of 40–80 kHz. The TF image was reconstructed using FrFT after denoising with a rotation angle of 42.5° such that their frequency components for echo and noise signals do not overlap in the frequency domain. TF, time-frequency; WC, tungsten carbide; FrFT, fractional Fourier transform.

신호이고, 수심 3-4 m 깊이에 출현하는 echo 신호는 학공치 개 체어 및 어군에 의한 응답신호이다. Fig. 2의 echogram에서 학 공치는 집어등의 불빛에 반응하여 음속 빔 영역으로 유영하는 행동패턴을 나타내었고, 각 개체어로부터의 echo 신호는 서로 중첩되거나, 또는, 서로 매우 인접하여 출현하는 응답특성을 나 타내었다. 어종 고유의 식별정보를 얻기 위해서는 이와 같이 서 로 중첩되어 수신되는 어군 echo 신호로부터 각 개체어의 echo 신호성분을 분리, 식별할 필요가 있는데, 본 연구에서는 FrFT 기법을 이용하여 학공치 개체어의 echo 신호를 주파수 스펙트 럼 영역에서 분리, 추출하였다.

Fig. 2의 echogram 상에 기록된 어류의 어종을 조사하기 위 하여 직접 손 낚시를 통해 현장에서 샘플링한 어획물은 Fig. 3 과 같다. Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 현장실험 당시 chirp 소너 시스템에 탐지된 어족생물은 학공치로서, 조사 당일 일몰 전후에 총 7마리를 샘플링하였다. 이들 학공치의 체장범위는 27.1-34.1 cm (평균체장 29.5 cm), 체중범위는 47-97 g (평균 체중은 64.7 g)이었다. 본 연구에서는 이와 같이 어종이 식별된 Fig. 2의 학공치 어군의 echo 응답신호를 대상으로 이들 어종 고유의 특징적인 식별정보를 추출하였다. 이를 위해 Fig. 2의 echogram에 나타난 echo 응답신호성분을 양자화하여 시간-주 파수 echo 이미지 패턴으로 재구축하였다. 또한, 각 개체어의 echo 신호에 대한 음향산란강도는 거리에 따른 확산감쇠와 주 파수에 기인하는 흡수감쇠특성 때문에 점차 약해지는데, 여기 서는 교정구의 echo 응답신호를 이용하여 학공치의 음향산란

#### 강도를 보정하였다.

#### 교정구의 chirp echo 응답특성

Fig. 2에 나타낸 학공치의 chirp echo 응답신호에 대한 확산 및 흡수감쇠를 보정하기 위하여 같은 조사정점에서 직경 40 mm 텅스텐 표준구를 사용하여 echo 응답신호를 측정한 결과 는 Fig. 4와 같다. 즉, Fig. 4의 chirp echo 신호를 이용하여 Fig. 2의 3-4 m 깊이에 출현하는 학공치의 chirp echo 신호에 대한 감쇠성분을 보정하였다. 교정구에 의한 chirp echo 응답패턴은 Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 수심이 증가함에 따라 점차 약 해지는 패턴을 나타내고 있다. chirp 소너 시스템의 음향학적 교 정을 수행할 때에는 집어등을 소등한 상태에서 실험을 수행한 관계로 표준구 주변에 어족생물이 군집하는 현상은 크게 나타 나지 않았다. 그러나, 산발적으로 개체어가 접근하거나, 해수의 유동에 기인하여 표준구가 흔들리는 현상 때문에 이에 따른 잡 음성의 신호성분이 표준구의 echo 응답신호와 함께 출현하였 다. 본 연구에서는 이들 잡음성의 신호성분을 FrFT 기법을 이 용하여 시간-주파수 이미지 영역에서 제거하였는데, 그 결과는 Fig. 5 및 Fig. 6과 같다.

Fig. 5는 본 연구에서 사용한 chirp 소너 시스템의 고주파 채 널, 즉, 110-220 kHz 주파수 범위에서 수록한 표준구의 echo 응 답신호에 혼입된 잡음성분을 제거한 시간-주파수 이미지 패턴 이다. 또한, Fig. 6은 저주파 채널, 즉, 40-80 kHz 주파수 범위 에서 수록한 표준구의 echo 응답신호에 혼입된 잡음성분을 제 거한 시간-주파수 이미지 패턴이다. Fig. 5a는 chirp 송·수파기 의 음축상 수심 약 3.5 m의 위치에 현수된 표준구로부터 측정한 chirp echo 신호에 대한 시간-주파수 이미지 패턴으로서, echo 신호의 시간 파형과 주파수 스펙트럼을 함께 나타내었다. Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 수심 3.5 m 부근에서 수록된 표준 구의 echogram 상에서는 뚜렷한 잡음성의 응답신호가 관찰되 지 않았다. 그러나, 실제, 이들 echo 신호를 정량적으로 분석하 여 시간-주파수 이미지 패턴을 구한 결과, 시간 구간 0-0.2 ms, 주파수 범위의 100-200 kHz 영역에서 잡음성의 echo 응답성 분이 출현하였다.

또한, 시간 구간 0.2-0.9 ms, 주파수 범위 110-220 kHz에서 선형적으로 나타나는 시간-주파수 이미지 패턴의 후방에 긴 꼬 리모양의 잡음성의 신호가 출현하였다. 이와 같이 나타나는 불 필요한 잡음신호는 표준구에 의한 주파수 스펙트럼 성분과 완 전히 중첩되어 출현하고 있기 때문에 제거되어야 한다. 만일, 이 들 잡음성분이 혼입된 표준구의 echo 응답신호를 이용하여 소 너 시스템을 교정하거나, 또는, 어류 echo 신호의 수신 레벨을 보정하면, 어종 고유의 식별정보를 추출하는 데 큰 오차가 포함 된다. 이 때문에 본 연구에서는 먼저 FrFT 기법을 이용하여 잡 음성분을 먼저 제거하였는데, 이 때, Fig. 1의 FrFT 기법에 대 한 각 단계별 echo 이미지 패턴을 구한 결과는 Fig. 5b, Fig. 5c 및 Fig. 5d와 같다. 즉, Fig. 1에 나타낸 FrFT 기법에 따라 잡음



Fig. 7. Separation of two spectrally overlapped broadband echo signals from free-swimming Japanese needlefish *Hypohamphus sajori* measured over the range of 110–220 kHz using FrFT. a, TF image before denoising. b, TF image after denoising. c, TF image for the separated component of the first echo signal. d, TF image for the separated component of the second echo signal. FrFT, fractional Fourier transform; TF, time-frequency.

성분을 제거할 목적으로 Fig. 5a의 시간-주파수 echo 이미지 패 턴를 시계방향으로 시간 축과 평행하게  $\alpha_{opt}$  =22.5° 만큼 회전시 킨 결과는 Fig. 5b와 같다. 즉, 교정구에 의한 시간-주파수 echo 이미지 패턴이 주파수 축과 수직으로 정렬되었다. 여기서, 최적 의 변환차수  $\alpha_{opt}$ 는 (6)식을 이용하여 추정하였다. 또한, 본 연구 에서는 Fig. 5b의 이미지 패턴에 110-220 kHz의 주파수 대역 필터를 적용하여 원래의 이미지 패턴을 주파수 영역에서 재성 형(reshape)하였는데, 그 결과는 Fig. 5c와 같다. 최종적으로는 Fig. 5c에서 재성형한 교정구의 시간-주파수 echo 이미지 패턴 을 다시 반시계 방향으로 22.5°만큼 회전시켜 원래의 위치로 복 귀시킨 결과는 Fig. 5d와 같다. 즉, Fig. 5a와 Fig. 5d의 이미지 패턴을 서로 비교해 볼 때, Fig. 5d의 시간-주파수 이미지 패턴 에 있어서는 Fig. 5a에 출현하였던 잡음신호성분들이 완전히 제 거되었음을 알 수 있다.

한편, 본 연구에서 사용한 chirp 소너 시스템의 저주파 채널을

통해 수록한 표준구의 echo 응답패턴에 대해서도 Fig. 5와 동일 한 방법으로 잡음신호성분을 제거하였다. 즉, 저주파 채널에서 도 교정구의 시간-주파수 echo 이미지 패턴을 시간 축과 평행하 게  $\alpha_{opt}$ 만큼 시계방향으로 회전시켜 잡음신호를 제거하였는데, 그 결과는 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서 최적의 변환차수  $\alpha_{opt}$ 는 (6) 식을 이용하여 추정하였는데,  $\alpha_{opt} = 42.5°$ 이었다.

본 연구에서는 Fig. 5와 Fig. 6의 고주파 및 저주파 채널에서 수록한 교정구의 echo 이미지 패턴정보를 바탕으로 현장에서 수록한 학공치의 음향산란강도에 대한 주파수 의존성 패턴을 분석, 고찰하였다.

#### 스펙트럼상에서 중첩된 개체어에 대한 chirp echo 신호의 분리 및 해석

본 연구에서 사용한 chirp 소너 시스템의 고주파 채널, 즉, 110-220 kHz 주파수 범위에서 수록한 학공치 어군에 대한 시



Fig. 8. Frequency dependence patterns on the TS for free-swimming Japanese needlefish *Hypohamphus sajori* measured over the range of 110–220 kHz. a, TS pattern for the chirp echo signal from the first fish of Fig. 7c. b, TS pattern for the chirp echo signal from the second fish of Fig. 7d. TS, target strength.

간-주파수 echo 이미지는 Fig. 7과 같다. Fig. 7에 나타낸 echo 이미지는 서로 분리되어 탐지되는 학공치 스펙트럼 패턴을 서 로 비교, 분석하기 위해 각 스펙트럼 레벨의 최대치를 기준으로 이미지를 정규화하여 나타낸 결과이다. 먼저, Fig. 7a에서 알 수 있는 바와 같이 echo 신호의 시간-주파수 이미지 패턴에는 매우 복잡한 형태의 잡음성분이 함께 나타났다. 또한, 2마리의 학공 치에 대한 echo 신호가 서로 인접하여 탐지되었는데, 이 신호로 부터 학공치에 의한 음향산란정보를 추출하기 위해서는 각 개 체어에 대한 시간-주파수 echo 이미지를 서로 분리시켜야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 Fig. 1과 Fig. 5에서 제안한 FrFT 기법 을 이용하여 잡음성분을 먼저 제거하였는데, 그 결과는 Fig. 7b 와 같다. Fig. 7b에서 서로 수직으로 분포한 2마리의 학공치에 대한 echo 신호는 시간과 주파수 공간에서 서로 다른 이미지 패 턴을 나타내었는데, 이는 각 학공치에 대한 echo 응답특성의 주 파수 의존성이 서로 다르기 때문이다. 즉, 같은 어종에 있어서 도 어류의 유영패턴과 자세각, 또한, 음파의 입사 방향 등이 변 화하면, echo 신호의 보강 및 상쇠간섭에 따른 echo 생성 매커 니즘이 매우 불규칙하게 됨을 의미한다. 이 때문에 어로현장에

서 어류 고유의 어종 의존적인 시간-주파수 이미지 패턴을 수록 하고, 이를 바탕으로 탐지어종을 식별해 내기 위해서는 Fig. 7b 와 같이 측정되는 다수의 어족생물로부터 얻어진 합성 echo 신 호를 대상으로 각 개체어 이미지 패턴을 분해하여 데이터 베이 스를 구축해야 한다. 특히, Fig. 7b에서 알 수 있는 바와 같이 2 마리의 학공치에 대한 echo 신호성분들은 주파수 스펙트럼 상 에서 완전히 중첩되고 있기 때문에 시간 영역, 또는, 주파수 영 역의 어느 한 영역에 대한 필터링 기법으로서는 분해할 수 없다. 따라서, 본 연구에서 제안한 시간-주파수 필터링 기법을 적용하 여 Fig. 7b에 나타낸 2마리 학공치의 echo 응답신호를 각각 분 리, 추출한 결과는 Fig. 7c 및 Fig. 7d와 같다. 즉, Fig. 7b는 Fig. 7a의 시간-주파수 이미지 패턴을 시계방향으로 22.5° 회전시킨 후, Fig. 5b에서와 같이 학공치 이외의 모든 echo 응답성분, 즉, 잡음성분을 제거한 echo 이미지 패턴이다. 또한, Fig. 7c는 Fig. 7b의 시간-주파수 이미지 패턴에서 첫 번째로 출현하는 학공치 의 echo 이미지 패턴을 분리, 추출한 결과이다. Fig. 7d는 Fig. 7b의 이미지 패턴에서 두 번째로 출현하는 학공치의 echo 이미 지를 분리, 추출한 결과이다.

Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이 어로현장에서 수집되는 어 족생물에 의한 chirp echo 신호속에 잡음성분이 혼입되어 있거 나, 또는, 여러 마리의 개체어에 의한 echo 응답신호가 서로 스 펙트럼상에서 중첩되어 있는 경우라도 시간-주파수 이미지 영 역에 출현하는 각 성분들이 서로 분리되어 있으면 FrFT 기법에 의한 시간-주파수 필터링을 통해 성공적으로 분해할 수 있음을 알 수 있었다. 향후, 본 연구에서 제안한 FrFT 기법에 의한 echo 신호의 분리기술은 어종식별을 위한 어종 고유의 시간-주파수 echo 이미지 패턴을 추출하는데 매우 효과적으로 활용할 수 있 을 것으로 판단된다.

한편, Fig. 7에서 분리, 추출된 2마리의 학공치의 echo 이미 지 패턴을 대상으로 음향산란강도의 주파수 의존성 패턴을 구 한 결과는 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서 종축은 반사강도(dB)이고, 횡축은 주파수(kHz)이다. 즉, Fig. 8은 Fig. 5에 나타낸 직경 40 mm의 텅스텐 표준구에 대한 고주파 echo 응답신호를 바탕으 로 2마리 학공치에 대한 고주파 echo 응답신호를 바탕으 감쇠 보정을 수행한 후, 이들 각 개체어에 대한 반사강도의 주 파수 의존성 패턴을 추출한 결과이다. 이 때, 각 주파수 의존성 패턴은 Fig. 7에서 모든 잡음성분이 제거된 각 개체어에 대한 시간-주파수 이미지로부터 재구축된 echo 신호를 이용하여 추 출되었다.

Fig. 8a와 Fig. 8b는 2마리의 학공치가 모두 chirp 소너 시스템 에 대한 송·수파기의 음축 상에 위치하고 있다는 가정하에서 추 정된 음향산란강도이다. 즉, 이들 2마리의 학공치로부터 수록 된 echo 신호에 대해서는 지향성을 보정하지 않은 상태에서 주 파수 의존성 패턴을 추정하였다. Fig. 8에 나타낸 2마리의 학공 치에 대한 산란강도패턴을 살펴볼 때, 서로 매우 유사한 특징적 인 응답패턴이 존재함을 관찰할 수 있다. 즉, 120, 130, 160, 170



Fig. 9. Separation of two spectrally overlapped broadband echo signals from free-swimming Japanese needlefish *Hypohamphus sajori* measured over the range of 40–80 kHz using FrFT. a, TF image before denoising. b, TF image after denoising. c, TF image for the separated component of the first echo signal. d, TF image for the separated component of the second echo signal. FrFT, fractional Fourier transform; TF, time-frequency.

및 190 kHz 부근에 출현하는 강한 echo 응답신호는 비록 그 레 벨에 있어서는 서로 차이가 있지만, 이들 응답이 출현하는 주파 수가 잘 일치하고 있다. 또한, 150 kHz 부근에서는 레벨이 급격 히 저하되는 공통적인 응답패턴을 나타내었다. 이로부터 이들 두 echo 응답신호의 변동패턴은 모든 주파수 범위에서 거의 일 치함을 알 수 있었다. 따라서, 이와 같은 결과로부터 어로 현장 에서 다수의 어족생물로부터 시간-주파수 echo 이미지 패턴을 수록하여 데이터 베이스를 구축하면, 이를 토대로 해당 어종을 효과적으로 식별할 수 있을 것으로 판단된다.

한편, chirp 소너 시스템의 저주파 채널, 즉, 40-80 kHz 주파 수 범위에서 수록한 학공치에 대한 시간-주파수 echo 이미지는 Fig. 9와 같다. Fig. 9의 시간-주파수 이미지는 Fig. 7에서와 같 이 주파수 스펙트럼 레벨의 최대치를 기준으로 echo 이미지를 정규화하여 나타낸 결과이다. 저주파 채널의 경우에 있어서도 Fig. 9a에서 관찰할 수 바와 같이 주파수 대역 40-80 kHz와 시 간구간 0-0.3 ms 영역에서 매우 복잡한 형태의 잡음성분이 함 께 나타났다.

Fig. 1과 Fig. 5에서 제안한 FrFT 기법을 이용하여 잡음성분 을 제거한 결과는 Fig. 9b와 같다. 따라서, 어종식별 이미지 패 턴을 얻기 위해서는 Fig. 9b에 나타난 2 마리의 학공치에 대한 저주파 대역의 합성 echo 이미지로부터 각 개체어의 이미지 패 턴을 분리, 추출할 필요가 있다. 그러나, 이들 2마리의 학공치에 대한 echo 신호성분들은 주파수 스펙트럼 상에서 서로 중첩되 어 있기 때문에 Fig. 7에서와 같이 시간 영역이나 주파수 영역 의 어느 한 영역에 대한 필터링 기법으로서는 분해할 수 없다. Fig. 1과 Fig. 5에서 제안한 시간-주파수 필터링 기법을 적용하 여 Fig. 9b에 출현하고 있는 2마리 학공치의 echo 응답신호를 각각 분리, 추출한 결과는 Fig. 9c 및 Fig. 9d와 같다. 즉, Fig. 9b 는 Fig. 9a의 시간-주파수 이미지 패턴을 시계방향으로 42.5°회 전시켜 학공치 이외의 모든 echo 응답성분, 즉, 잡음성분을 제 거한 echo 이미지 패턴이다. 또한, Fig. 9c는 Fig. 9b의 시간-주 파수 이미지 패턴으로부터 첫 번째로 출현하는 학공치의 echo 이미지 패턴을 분리, 추출한 결과이다. Fig. 9d는 Fig. 9b의 이미 지 패턴에서 두 번째로 출현하는 학공치의 echo 이미지를 분리, 추출한 결과이다. 이와 같이 분리, 추출된 2마리의 학공치의 저 주파 echo 이미지 패턴을 대상으로 음향산란강도의 주파수 의 존성 패턴을 구한 결과는 Fig. 10과 같다. Fig. 10에서 종축은 음 향산란강도(dB)이고, 횡축은 주파수(kHz)이다. 즉, Fig. 10은 Fig. 9c와 Fig. 9d에 나타낸 각 학공치의 저주파 echo 응답신호 를 Fig. 6의 직경 40 mm 텅스텐 표준구에 의한 저주파 echo 응 답신호를 바탕으로 주파수 영역에 대한 확산 및 흡수감쇠 보정 을 수행한 후, 이들 각 개체어에 대한 음향산란강도의 주파수 의 존성 패턴을 추출한 결과이다.

Fig. 10에서 알 수 있는 바와 같이 첫 번째 학공치에 대한 음향 산란강도의 주파수 의존성 패턴은 두 번째 탐지된 학공치의 주 파수 의존성패턴보다 약 4-5 dB 더 높았다. 이들 2마리에 대한 학공치의 음향산란강도 패턴을 살펴볼 때, 43, 51, 72 및 77 kHz 부근에서 공통적으로 완만한 peak 모드가 출현하였다. 또한, 51 kHz부터 70 kHz까지의 범위에서는 음향산란강도가 매우 완만 하게 감소하는 공통적인 패턴을 나타내었다. Fig. 8과 Fig. 10의 저주파와 고주파 영역에 대한 산란강도의 주파수 의존성 패턴 을 서로 비교할 때, 저주파 영역보다 고주파 영역에서 더 복잡 한 주파수 의존성 패턴을 나타내었다. 본 연구에서는 Fig. 2의 echogram 상에 기록된 학공치를 실험현장에서 손 낚시로 샘플 링한 후, 실험실로 옮겨 투명 아크릴 수조에서 반사강도의 주파 수 의존성 패턴을 구하였는데, 그 결과는 Fig. 11과 같다. 즉, 조 사당시 샘플링한 7마리의 학공치 중에서 체장과 체중이 평균치



Fig. 10. Frequency dependence patterns on the TS for free-swimming Japanese needlefish *Hypohamphus sajori* measured over the range of 40–80 kHz. a, TS pattern for the chirp echo signal from the first fish of Fig. 9c. b, TS pattern for the chirp echo signal from the second fish of Fig. 9d. TS, target strength.



Fig. 11. X-ray photograph (a), the frequency dependence on target strength as a function of pitch angle (b) and the mean TS pattern over a pitch angle  $\pm 10^{\circ}$  in the dorsal plane (c) for a Japanese needlefish *Hypohamphus sajori* (L=294 mm, W=73 g) caught by pole and line at the survey site. The TS was measured in the laboratory tank. TS, target strength.

에 근사한 어체(체장 294 mm, 체중 73 g)를 대상으로 반사강도 의 주파수 의존성을 측정하였는데, 이 어체의 x-ray 사진은 Fig. 11a와 같다. 또한, Fig. 11b는 반사강도의 주파수 및 자세각 의 존성을 나타낸 결과이고, Fig. 11c는 Fig. 11b에서 ±15°의 자세 각 범위에 대한 평균반사강도의 주파수 의존성 패턴을 나타낸 결과이다. Fig. 11c에서 종축은 반사강도(dB)이고, 횡축은 주파 수(kHz)이다. Fig. 11a에서 학공치의 부레는 척추골 바로 하부 에 위치하면서 자세각이 거의 0°에 가까운 수평적인 패턴이었 고, 그 구조는 길이와 높이가 각각 81 mm와 4.5 mm인 긴 원통 형이었다. 이와 같은 부레의 형태학적 특성 때문에 반사강도의 자세각 의존성은 자세각 0°부근에서 echo 응답이 매우 강하게 집중되어 나타났다. 또한, Fig. 11b에서 강한 echo 성분은 자세 각 0°를 기준으로 좌우 대칭적인 패턴을 나타내었는데, 특히, 저 주파수 영역에서는 매우 넓은 자세각 범위에서 확산되어 나타 났다. 그러나, 이들의 echo 응답 패턴은 주파수가 증가함에 따 라 등 방향의 자세각 ±15° 범위내로 집중되어 수렴되는 경향을 나타내었다. 이 때문에 본 연구에서는 등 방향의 자세각 ±15° 범위에 대한 평균반사강도를 구하여 주파수 의존성을 분석하 였는데, 그 결과는 Fig. 11c와 같다. 또한, Fig. 11c에서는 Fig. 8 에 나타낸 현장에서 측정한 주파수 의존성 패턴과 비교할 목적 으로 110-200 kHz의 주파수 범위에 대한 음향산란강도의 주 파수 의존성 데이터만을 나타내었다. Fig. 11의 b와 c에서 알 수 있는 바와 같이 110-120 kHz의 영역에서는 -45 dB 부근에서 거의 일정한 echo 응답패턴을 나타내다가 120-125 kHz 부근 에서는 echo 응답이 일시적으로 약화되는 경향을 나타내었다. 그 후, 130-170 kHz 주파수 영역에서는 -45 dB 부근에서 불규 칙하게 변동하는 echo 응답패턴을 나타내었지만, 170 kHz 이 후의 주파수에서는 echo 응답강도가 점차 감소되는 경향을 나 타내었다. 또한, 190 kHz 이후에서는 -50 dB 부근에서 변동하 는 echo 응답특성을 나타내었다. Fig. 11c의 실험수조에서 얻은 평균 주파수 의존성 패턴은 Fig. 8의 현장 실험을 통해 측정한 패턴과 큰 차이를 나타내었다. 이와 같은 현상은 Fig. 8에 나타 낸 학공치의 유영상태나 자세각 등에 대한 정보가 없어 정량적 인 비교는 어렵지만, 현장에서 자유 유영하는 학공치의 순간적 인 echo 응답은 Fig. 11b의 어느 한 자세각에 대한 echo 응답에 상당한다. 특히, 실험실의 잘 제어된 환경하에서의 응답특성을 살펴볼 때, 등방향의 자세각 ±15° 범위에 대한 echo 응답의 주 파수 및 자세각 의존성이 매우 불규칙하게 변동하고 있는 점으 로부터 현장에서의 echo 응답특성은 더욱 큰 변동특성을 나타 낼 것으로 판단된다.

#### 어군 echo 신호의 시간-주파수 이미지 패턴

Chirp 소너 시스템의 고주파 채널을 통해 수록한 학공치 어 군에 대한 시간-주파수 echo 이미지의 일례는 Fig. 12와 같다. Fig. 12는 송·수파기 직하에 존재하는 다수의 학공치로부터 수 록된 echo 응답신호이다. Fig. 12a에 나타낸 echo 응답신호의



Fig. 12. TF images of the broadband echo signal from an aggregation of free-swimming Japanese needlefish *Hypohamphus sajori* before removed (a) and after removed (b) the noise by doing the time-frequency filtering using FrFT. The TF image show that it is not possible to separate and resolve the echo signals of individuals if the fishes are closely spaced inside the aggregation. TF, timefrequency; FrFT, fractional Fourier transform.

시간-주파수 이미지 패턴에는 매우 넓은 영역에 걸쳐 복잡한 잡 음성분이 함께 출현하였다. Fig. 12b는 Fig. 1과 Fig. 5에서 제안 한 FrFT 기법을 이용하여 잡음성분을 제거한 시간-주파수 이미 지 패턴이다. Fig. 12b에서 알 수 있는 바와 같이 각 개체어가 거 리분해능 이내로 근접하여 농밀하게 분포하면, 이들 어군 echo 응답신호로부터 각 개체어에 대한 echo 신호성분을 분해하여 추출하는 것이 매우 어렵다. 이 때문에 어종 의존적인 식별정보 를 수집하기 위해서는 어로 현장에서 수록되는 매우 많은 chip echo 신호 중에서 독립적인 개체어나, 또는, 거리분해능 이상으 로 분산된 개체어를 대상으로 각 개체어에 대한 echo 신호성분 을 분해하여 데이터 베이스를 구축할 필요가 있다. 본 연구에서 제안한 FrFT 기법에 의한 시간-주파수 필터링 및 echo 신호의 분리, 추출기법은 거리분해능 이상으로 분산된 다수의 개체어 로부터의 chirp echo 신호 중에서 특히, 주파수 스펙트럼상에서 중첩된 echo 신호성분을 분리, 추출하는데 매우 효과적으로 활 용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 사 사

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2021년)에 의하 여 연구되었음.

#### References

- Clay CS and Horne JK. 1994. Acoustic models of fish: The Atlantic cod (*Gadus morhua*). J Acoust Soc Am 96, 1161-1668. https://doi.org/10.1121/1.410245.
- 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.
- Fassler SMM, Fernandes PG, Semple SIK and Brierley AS. 2009. Depth-dependent swimbladder compression in herring *Clupea haengus* obserbed using magnetic resonance imaging. J Fish Bio 74, 296-303. https://doi.org/10.1111/ j.1095-8649.2008.02130.x.
- Foote KG. 1980. Importance of the swimbladder in acoustic scattering by fish: A comparison of gadoid and mackerel target strengths. J Acoust Soc Am 67, 2084-2089. https://doi.org/10.1121/1.384452.
- Lee DJ, Kwak MS and Kang HY. 2014. Design and development of a broadband ultrasonic transducer operating over the frequency range of 40 to 75 kHz. Korean J Fish Aquat Sci 47, 292-301. https://doi.org/10.5657/KFAS.2014.0292.
- Lee DJ. 2014. Bandwidth enhancement of a broadband ultrasonic mosaic transducer using 48 tonpilz transducer elements with 12 resonance frequencies. Korean J Fish Aquat Sci 47, 302-312. https://doi.org/10.5657/KFAS.2014.0302.
- 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. 2015a. Time-frequency analysis of broadband acoustic scattering from chub mackerel *Scomber japonicas*, goldeye rockfish *Sebestes thompsoni*, and fat greenling *Hexagrammos otakii*. Korean J Fish Aquat Sci 48, 221-232. https://doi. org/10.5657/KFAS.2015.0221.
- Lee DJ. 2015b. Changes in the orientation and frequency dependence of target strength due to morphological differences in the fish swim bladder. Korean J Fish Aquat Sci 48, 233-243. https://doi.org/10.5657/KFAS.2015.0233.

- Lee DJ, Kang HY and Pak YY. 2016. Time-frequency feature extraction of broadband echo signals from individual live fish for species identification. Koreanj J Fish Aquat Sci 49, 214-223. https://doi.org/10.5657/KFAS.2016.0214.
- 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.
- Lohmann AW. 1993. Image rotation, Wigner rotation, and the fractional Fourier transform. J Opt Soc Am A 10, 2181-2186. https://doi.org/10.1364/JOSAA.10.002181.
- Namias V. 1980. The fractional order Fourier transform and its application to quantum mechanics. IMA J Appl Math 25, 241-265. https://doi.org/10.1093/imamat/25.3.241.
- Narayanan VA and Prabhu KMM. 2003. The fraction Fourier transform: theory, implementation and error analysis. Microprocess Microsyst 27, 511-521. https://doi.org/10.1016/ S0141-9331(03)00113-3.
- Nesse TL, Hobek H and Korneliussen RJ. 2009. Measurement of acoustic-scattering spectra from the whole and pars of Atlantic mackerel. ICES J Mar Sci 66, 1169-1175. https://doi. org/10.1093/icesjms/fsp087.
- Ozaktas HM and Mendlovic D. 1993. Fractional Fourier transforms and their optical implementation: I. J Opt Soc Am A 10, 1875-1881. https://doi.org/10.1364/JOSAA.10.001875.
- Robotham H, Bosch P, Gutierrez-Estrada JC, Castillo J and Pulido-Calvo I. 2010. Acoustic dentification of small pelagic fish species in Chile using support vector machines and neural networks. Fish Res 102, 115-122. https://doi. org/10.1016/j.fishres.2009.10.015.
- Stanton TK, Chu D, Jech JM and Irish JD. 2010. New broadband methods for resonance classification and high-resolution 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.
- Stanton TK, Sellers CJ and Jech JM. 2012. Resonance classification of mixed assemblages of fish with swimbladders using a modified commercial broadband acoustic echosounder at 1-6 kHz. Can J Fish Aquat Sci 69, 854-868. https://doi. org/10.1139/F2012-013.
- Xia XG 1996. On bandlimited signals with fractional Fourier transform. IEEE Signal Process Lett 3, 72-74.