

어군에 의한 광대역 음향산란신호의 시간-주파수 분석을 위한 chirp 데이터 수록 및 처리 시스템의 성능특성

이대재*

부경대학교 해양생산시스템관리학부

Performance Characteristics of a Chirp Data Acquisition and Processing System for the Time-frequency Analysis of Broadband Acoustic Scattering Signals from Fish Schools

Dae-Jae Lee*

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

A chirp-echo data acquisition and processing system was developed for use as a simplified, PC-based chirp echo-sounder with some data processing software modules. The design of the software and hardware system was implemented via a field-programmable gate array (FPGA). Digital signal processing algorithms for driving a single-channel chirp transmitter and dual-channel receivers with independent TVG (time varied gain) amplifier modules were incorporated into the FPGA for better real-time performance. The chirp-echo data acquisition and processing system consisted of a notebook PC, an FPGA board, and chirp sonar transmitter and receiver modules, which were constructed using three chirp transducers operating over a frequency range of 35-210 kHz. The functionality of this PC-based chirp echo-sounder was tested in various field experiments. The results of these experiments showed that the developed PC-based chirp echo-sounder could be used in the acquisition, processing and analysis of broadband acoustic echoes related to fish species identification.

Key words: Chirp data acquisition and processing system, Broadband acoustic echoes, Time-frequency analysis, Fish species identification

서론

대부분의 어족생물은 태양의 고도 변화에 따라 주-야간의 수중조도가 변화하면, 이에 적응하여 저층 또는 표층으로 향하는 연직회유이동을 한다. 이 때, 부레를 갖는 어류는 부레의 체적을 변화시켜 유영층에 적합한 부력을 유지하기 위한 생태학적 습성을 나타낸다(Fässler et al., 2009). 이와 같이 해중에서 어류가 부레의 체적을 변화시키면, 해수-어체의 생체조직-부레의 공기 챔버(air chamber) 상호간에 형성되는 음향 임피던스의 차, 즉 밀도 및 음속 contrast의 불연속 경계층의 형상 및 배열패턴 등이 변화한다. 이 때문에 이들 경계층으로부터 생성되는 echo 응답특성이 매우 불규칙하게 변동한다(Foote, 1980; Stanton et al., 2010). 이 현상은 부레의 형상이나 체적공간의 변화와 어체의 생체조직 상호간에 대한 음향산란신호의 보강 및 상쇄간섭

패턴 등에 따라 변화하지만, 이 때 echo 응답신호는 사용 주파수에 따라 매우 복잡하게 변동한다. 따라서, 넓은 주파수 대역에 걸쳐 나타나는 echo 신호의 변동특성을 정량적으로 조사, 분석하면, 해당 어종 고유의 특징적인 echo 응답성분을 추출할 수 있다(Simmons et al., 1996; Lee et al., 2014; Lee, 2014; Lee et al., 2015). 즉, 현장에서 이들 어종 의존적인 echo 응답성분을 정량적으로 수집, 분석하면, 탐지어종의 음향학적 식별이 가능하다고 판단된다(Fernandes, 2009). 그러나, 이를 위해서는 어로 현장에서 chirp 펄스신호의 송신과 수신, 또한, 신호처리를 위한 chirp 데이터 수록 및 처리 시스템이 필요하다.

본 연구에서는 이 점에 주목하여 FPGA (Field-Programmable Gate Array) 모듈(Digilent, 2011; Gadek et al., 2014)을 사용하여 chirp echo 데이터 수록 및 처리 시스템을 설계, 개발하고, 이 시스템의 성능특성을 실험적으로 평가, 분석하였다.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2018.0178>



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.

Korean J Fish Aquat Sci 51(2) 178-186, April 2018

Received 8 March 2018; Revised 7 April 2018; Accepted 9 April 2018

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

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

재료 및 방법

Chirp echo 데이터 수록 및 처리 시스템의 설계

본 연구에서 chirp echo 데이터 수록 및 처리 시스템의 개발에 사용한 FPGA 모듈(Digilent, 2011)은 Nexys 2 board (Spartan-3E FPGA 1200K, Xilinx, USA)이다. 이 FPGA 모듈은 VGA (video graphics array), RS232 (recommended standard 232), USB (universal serial bus), PS/2 (personal system/2), LED (light-emitting diode), 고속확장 커넥터, PMOD (peripheral module) 커넥터, 5 V 전원, 50 MHz 신호발생기(clock generator) 등을 구비하고 있다. 본 연구에서는 GPIO (general purpose input/output) 인터페이스, 즉, 2개의 6핀(pin) PMOD I/O 인터페이스를 이용하여 FPGA 보드에서 생성한 trigger 동기신호, TVG (time varied gain) 증폭기의 제어신호, chirp 펄스신호를 외부의 2채널 전치증폭기 모듈과 1채널의 전력증폭기 모듈에 출력하였다. 또한, 1개의 POMD I/O 인터페이스는 전치증폭기 모듈에서 양자화되는 chirp echo 신호의 디지털 데이터를 FPGA 모듈로 입력시키는데 사용하였다. Chirp echo 수록 시스템의 구동은 먼저 FPGA 모듈을 통해 (1)식으로 정의되는 chirp echo 데이터 수록을 위한 송신 chirp 펄스신호를 발생시킨 후, 이 신호를 Fig. 1의 chirp 송신모듈에서 전력 증폭하여 미국 Airmar 사의 chirp 음향변환기(B256L, B265H, B75M) 및 저자가 자체 개발한 광대역 음향변환기(Lee, 2017) 등에 공급하였다. (1)식에서 f_0 는 chirp 신호성분의 시작 주파수이고, $2a+f_0$ 는 순

간 주파수(instantaneous frequency)이다. 따라서, 송신펄스신호의 시간-주파수 변화율은 chirp 펄스 폭의 지속시간 (T)과 주파수 대역폭 (B)의 비, 즉, $2a(=B/T)$ 값에 의해 자유롭게 변화시킬 수 있다(Cowell and Freear, 2010).

$$s(t) = e^{j2\pi(at^2 + f_0 t + c)} \dots\dots\dots(1)$$

즉, 송신 chirp rate를 크게 할수록 더 광범위한 범위의 주파수 성분이 포함되지만, 본 연구에서는 chirp 송·수파기의 주파수 대역폭을 고려하여 f_0 는 20 kHz, $2a$ 는 200 kHz로 설정하여 chirp 펄스신호를 발생시켰다. 본 연구에서 설계, 개발한, chirp echo 데이터 수록 및 처리 시스템은 송신용과 수신용 음향 변환기를 별도로 사용할 수 있도록 하였다. 그것은 하나의 송신 모듈을 이용하여 2채널의 수신신호를 독립적으로 얻기 위해 설계되었기 때문이다. 이렇게 함으로서 향후 광대역의 듀얼빔(dual beam) 어군탐지거나 광대역의 사이드 스캔 소너(side scan sonar)로서 활용할 수 있기 때문이다. Chirp echo 신호의 수신은 chirp 송파기로부터 해중으로 발사된 펄스신호가 어군에 의해 산란되어 수파기 1과 수파기 2에 각각 수신되면, 이들의 신호는 전치증폭기, TVG 증폭기, 대역필터를 거쳐 A/D 변환기에서 양자화된다. 본 연구에서 사용한 A/D 변환기는 12 bit의 ADC7476 (Texas instruments, USA)으로서 최대 샘플링 주파수는 1 MHz이다. 본 연구에서 사용한 음향변환기의 작동 주파수 범위는 35-75 kHz (Lee, 2017; B265L, Airmar), 75-130 kHz (B75M, Airmar) 및 130-210 kHz (B265H, Airmar) 등으

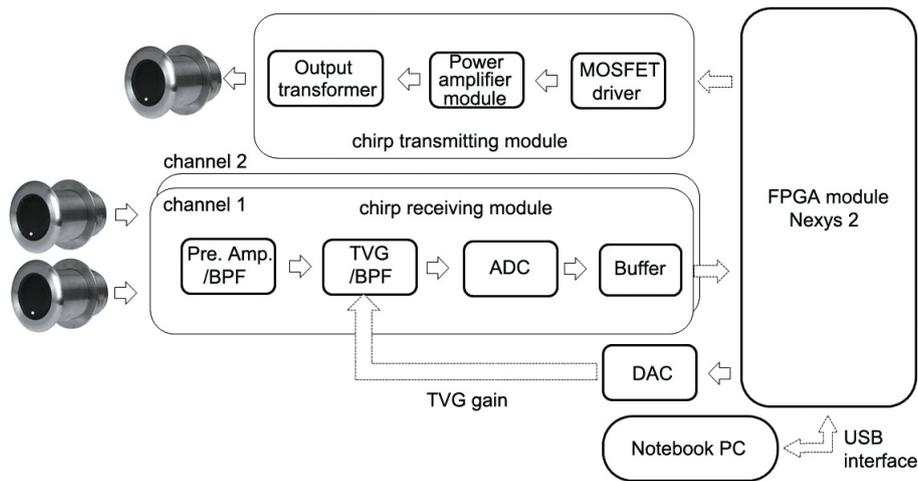


Fig. 1. Schematic diagram of the chirp data acquisition system for measuring and analyzing the broadband acoustic echoes from fish schools. The system consists of an FPGA (field-programmable gate array), two receiver modules composed of two channel TVG (time varied gain) amplifiers and A/D converter modules, a chirp signal generator implemented on a PC, a transmitter module composed of power amplifier and transformer, and three chirp transducers. The software modules for accomplishing the input/output, control and signal processing were created specifically for this application. The communication with FPGA hardware is managed by a USB-based protocol and associated USB interface. ADC, analog-to-digital converter; BPF, bandpass filter; DAC, digital-to-analog converter MOSFET, metal oxide semiconductor field effect transistor.

로서, 전체의 사용가능 주파수 대역은 35-210 kHz 범위이다.

본 연구에서는 이와 같은 chirp 송·수파기의 사용가능 주파수 대역을 고려하여 FPGA 모듈에서 펄스 폭 1.0 ms, 주파수 범위 20-220 kHz의 송신 chirp 펄스신호를 발생시켜 전력증폭기 모듈에 공급하였다. 이 전력 증폭기에 접속된 출력 트랜스포머(transformer)로부터 송출되는 chirp 펄스신호는 송파용 chirp 음향변환기를 통해 수중으로 송출되었다. 즉, 저주파수와 고주파수 대역의 echo 신호를 측정 시에는 2개의 B265LH 송수파기를 사용하여 1개는 송신용으로, 다른 한 개는 수신용으로 사용하였다. 또한, 75-130 kHz의 중간 주파수 대역에 대한 echo 신호를 측정 시에는 2개의 B75M 송수파기를 각각 송신용과 수신용으로 사용하였다. 또한, 자체 개발한 음향변환기(Lee, 2017)는 저주파 대역에 대한 송신용으로 병행하여 사용하였다.

Chirp echo 신호의 시간-주파수 분석

본 연구에서는 SPWVD (smoothed pseudo wigner-ville distribution) 기법을 도입하여 어군으로부터 산란되는 chirp echo 신호의 시간 주파수 분석을 수행하였다(Shui et al., 2007; Han and Kim, 2010). 특히, SPWVD 기법은 넓은 주파수 대역의 각 주파수 성분 사이에 나타나는 간섭잡음을 효율적으로 억제 및 감소시키는데 유효한 기법이라는 데에 주목하여 본 연구에

Table 1. Specifications of hardware modules consisting of the chirp data acquisition and processing system developed in this study

Hardware modules	Specification
FPGA	Xilinx Spartan-3E FPGA 1200K gate
	Four 12-pin Pmod interface
	VGA, PS/2, USB2 and serial ports
	Hirose FX2 connector
	16 MB PSDRAM & 16 MB strataflash ROM
Chirp transmitting module	50 MHz oscillator
	Chirp output pulse signal 20-220 kHz
	Output power 100 W Chirp pulse duration 1.0ms
Chirp receiving module	TVG gain 96.8 dB (0.48 dB step)
	ADC 12 bit 1 MHz sampling
	Pre-amp gain 24 dB
	Bandpass filter 25-85 kHz (L), 100-220 kHz (H) DAC 16 bit 5V output
Chirp transducer	Airmar B265LH and B75M, Self-made transducer (Lee, 2017)

Notebook PC Dell inspiron (2.53 GHz, windows 7, core i5)
FPGA, field-programmable gate array; VGA, video graphics array; TVG, time varied gain; ADC, analog-to-digital converter; DAC, digital-to-analog converter.

서 도입하였다. SPWVD 기법은 WVD (wigner-ville distribution) 기법을 변형한 형태로서(Imberger and Boahsh, 1986), SPWVD 함수(Blaska and Sedlacek, 2001; Dong and Cui, 2012)는

$$SPWVD_x(f,t) = g(t) * \left(\int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) \left[x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \right] e^{j\omega\tau} d\tau \right) \dots\dots\dots(2)$$

에 의해 정의된다. 여기서, *는 시간 t에 대한 convolution이고, 함수 g(t)는 시간평활 윈도우함수(time smoothing window function), h(τ)는 시간영역에 있어서 주파수 평활 윈도우함수(frequency smoothing window function)이다. (2)식의 convolution을 적분으로 나타내면,

$$SPWVD_x(f,t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) \int_{-\infty}^{+\infty} g(s-t) \left[x\left(s + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(s - \frac{\tau}{2}\right) \right] ds e^{j\omega\tau} d\tau \dots\dots(3)$$

와 같이 표시된다. 이 식을 이산화하여 나타내면(Shui et al., 2007),

$$SPWVD_x(f,n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} h(m) \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(k) x(n+m+k) x^*(n+m-k) e^{-j4\pi fk} \dots\dots(4)$$

이 되고, 여기서 m과 k는 각각 τ와 t에 대한 시간 index이고, x(n)은 이산화된 어류 echo 신호이다. (4)식에서 어류 echo 신호에 대한 시간-주파수 분석을 수행할 때, SPWVD 함수에 포함되어 있는 시간과 주파수 평활 윈도우 함수 g(k)와 h(m)의 윈도우를 변화시키면, 시간과 주파수 영역에 대한 분해능을 향상시킬 수 있다. 본 연구의 chirp echo 데이터 수록 및 처리 시스템에서는 (4)식을 이용하여 어군 echo 신호의 시간-주파수 이미지 응답특성을 분석, 고찰하였다.

현장실험에 의한 echo 응답특성의 측정 및 성능평가

본 연구에서 실험적으로 설계, 개발한 chirp 데이터 수록 및 처리 시스템의 성능특성을 평가하기 위한 현장실험은 2015년 6월 23일 및 2016년 2월 4일에 부경대학교 실습선 가야호(총톤수 1,737톤)를 사용하여 부산 북항의 제 5부두에서 실시하였다. 먼저 chirp 데이터 수록 및 처리 시스템의 설계 파라미터를 조정하기 위한 기본적인 성능 특성은 2015년 6월 23일에 부산 북항의 제 5부두에 접안, 계류 중인 가야호의 선상에서 수행되었다. 한편, chirp 데이터 수록 및 처리 시스템의 광대역 주파수 응답 특성은 2016년 2월 4일에 부산 북항의 제 5부두에 접안, 계류 중인 가야호의 선상에서 텅스텐 교정구[tungsten carbide sphere with 6% cobalt binder (WC), 직경 40 mm]로부터 수록한 echo

응답신호의 시간-주파수 분석을 통해 얻어졌다. 한편, 어군의 echo 응답특성은 2016년 2월 4일에 부산 북항의 제 5부두에서 실험적으로 설계한 chirp 데이터 수록 및 처리 시스템을 사용하여 수록 및 분석하였다.

결과 및 고찰

Chirp echo 데이터 수록 및 처리 시스템의 성능특성

본 연구에서 설계, 개발한 chirp echo 데이터 수록 및 처리 시스템의 하드웨어 부분과 소프트웨어 레이아웃은 각각 Fig. 2 및 Fig. 3과 같다. Fig. 2의 (a)는 FPGA에 접속되어 있는 2채널의 TVG 내장 수신모듈과 1채널의 송신모듈, 또한 입출력 인터페이스 모듈 등을 나타낸 하드웨어 시스템이다. Fig. 2의 (b)는 부경대학교 실습실에서 어군의 echo 신호를 수록중인 실험장면이다. 한편, Fig. 3은 2015년 6월 23일 부산 북항의 제 5부두에 접안, 계류 중인 가야호의 선상에서 echo 신호를 수록, 표시 및 처리한 결과의 일례를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 본 연구에서 설계한 chirp 데이터 수록 및 처리 시스템에 대한 echo 데이터의 표시, 수록 및 신호 처리는 크게 3개의 기능으로 구현하였다. 즉, 2채널에 대한 각각의 chirp echo 신호에 대한 시간응답특성 해석, 각 채널의 echo 신호에 대한 주파수 스펙트럼의 분석, 또한, 이들 2채널의 응답신호 사이의 위상차 패턴의 분석 등이다. 여기서, 2채널 상호간에 대한 위상차 정보의 표시 및 수록은 향후 chirp split beam 어군탐지 시스템으로서의 활용을 고려하여 설계, 개발된 소프트웨어 모듈이다(Lee and Shin, 2001; Lee and Lee, 2010; Lee and Lee, 2011; Lee, 2011). 이 때문에 Fig. 3의 레이아웃에는 2개의 수신용 chirp 진동자 사이의 음향학적 중심 간격에 대한 정보가 필요하다. 본 연구에서 개발한 Fig. 2의 chirp 데이터 수록 및 처리 시스템은 Fig. 3의 레이아웃에 나타낸 바와 같이 20-220 kHz의 고정된 주파수 범위에서 동작하지만, 펄스 폭과 펄스 반복주기는 사용자가 자유롭게 설정할 수 있도록 하였다. 또한, 수신부의 전단에 대한 전치 증폭기의 이득은 0-40 dB, TVG 증폭기는 no-TVG, 10 log (r), 20 log (r), 30 log (r), 40 log (r) 중에서 사용자가 선택할 수 있도록 하였다. Chirp echo 신호의 시간 파형, 주파수 스펙트럼 및 위상정보 등의 수록은 각각 255 ping에 대한 데이터 블록을 1개의 파일로서 작성하여 하드 디스크에 저장할 수 있도록 하였다. 이 때, 주파수 스펙트럼의 계산을 위한 FFT window는 사용자가 선택할 수 있도록 하였다. 또한, 시간 파형과 주파수 스펙트럼의 표시는 사용자가 희망하는 범위를 자유롭게 선택할 수 있도록 하였지만, 특정 chirp echo 신호에 대한 주파수 스펙트럼만이 측정 대상이 되는 경우에는 cursor 기능을 이용하여 이를 수행할 수 있도록 하였다.

한편, 이와 같이 수록된 chirp echo 신호에 대한 시간-주파수 분석은 별도의 window에서 처리할 수 있도록 소프트웨어를 구축하였다. 즉, 데이터 파일 목록에서 호출된 chirp echo 신호의

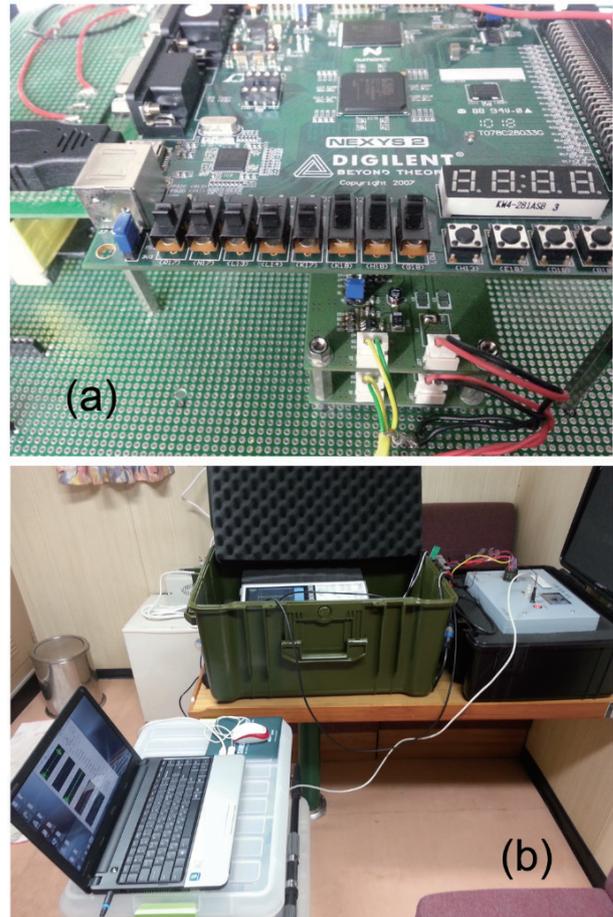


Fig. 2. Photographs of the chirp data acquisition and processing system developed in this study. (a) An FPGA (Field-Programmable Gate Array) board connected to two receiver modules and a transmitter module. (b) A completed PC-based chirp echo-sounder composed of a chirp transceiver, a PC-based data processing system and an additional data monitoring system.

특정 구간을 지정하여 SPWVD 처리 모듈에 전송하면 (4)식에 의해 시간-주파수 echo 응답특성이 자동적으로 생성되도록 하였다. 향후 본 연구에서 개발한 chirp 데이터의 수록 및 처리 시스템을 사용하면 현장에서 직접 각 어종에 대한 개체어로부터의 시간-주파수 echo 이미지의 수록이 가능하기 때문에 어종식별을 위한 데이터 베이스의 구축에 매우 유효할 것으로 판단된다. 그러나, 이를 위해서는 우리나라 주변해역에 분포하는 주요 어족생물을 대상으로 현장에서 각 어종에 대한 다량의 시간-주파수 echo 이미지가 확보되어야 한다(Lee, 2015a; Lee, 2015b; Lee et al., 2016; Lee, 2016).

교정구의 시간-주파수 echo 응답특성

본 연구에서 설계, 개발한 chirp 데이터 수록 및 처리 시스템의

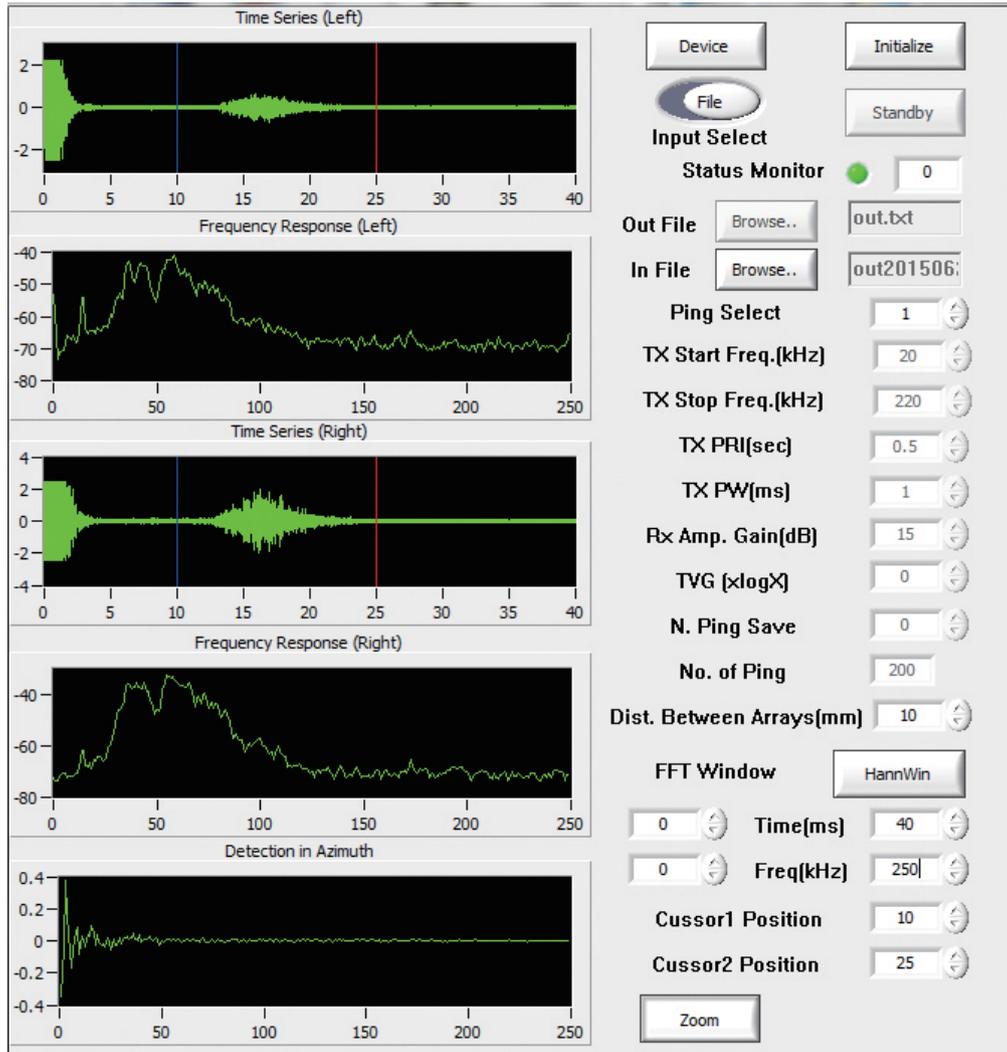


Fig. 3. Layout for the software module of the chirp data acquisition and processing system developed in this study.

성능특성을 평가하기 위해 텅스텐 교정구(WC, 직경 40 mm)를 사용하여 echo 신호의 응답특성을 조사, 분석한 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4는 2016년 2월 4일 부산 북항의 제 5부두에 접안, 계류 중인 가야호 선상에서 수록한 echogram이다. 조사 당시 북항 제 5부의 수심은 약 9.5 m, 해도상에 표기된 저질은 펄이었다. Fig. 4는 chirp 송·수파기를 수면하 약 4.0 m 깊이에 고정시킨 후, 텅스텐 교정구를 chirp 송·수파기의 방사면 직하 약 3 m(수심 약 7 m)의 음축상에 현수시킨 상태에서 echo 데이터를 수록, 분석한 결과이다. Fig. 4에서 수심 7 m와 9.5 m에 각각 출현하는 echo 신호는 각각 텅스텐 교정구와 해저에 의한 echo 응답신호이다. 이들 echo 응답신호는 조사선을 계류시킨 상태에서 측정된 관계로 매우 안정된 응답특성을 나타내었다. 본 연구에서는 Fig. 4의 교정구에 대한 chirp echo 응답신호로부터 추출한 시간-주파수 이미지 패턴을 바탕으로 저주파수 및 고

주파수 대역에 대한 chirp sonar 시스템의 성능특성을 분석, 고찰하였는데, 그 결과는 Fig. 5 및 Fig. 6과 같다. Fig. 5는 Fig. 2의 chirp 데이터 수록 및 처리 시스템에 대한 저주파수 채널, 즉, 35-75 kHz의 주파수 대역에 대한 echo 응답특성을 나타낸 것이다. Fig. 5의 (a)는 시간응답파형, (b)는 주파수 스펙트럼, (c)는 2차원 시간-주파수 이미지 패턴, (d)는 3차원 시간-주파수 contour 패턴을 각각 나타낸 것이다.

한편, Fig. 6은 고주파수 채널, 즉, 130-210 kHz의 주파수 대역에 대한 echo 응답특성을 나타낸 것이다. Fig. 5와 마찬가지로 Fig. 6의 (a)는 시간응답파형, (b)는 주파수 스펙트럼, (c)는 2차원 시간-주파수 이미지 패턴, (d)는 3차원 시간-주파수 contour 패턴을 각각 나타낸 것이다. 실제 현장에서 수록한 Fig. 4의 표준구에 대한 echo 응답신호에는 불규칙한 잡음신호가 혼입되어 있었으나, 본 연구에서는 잡음제거 신호처리를 수행한 후,

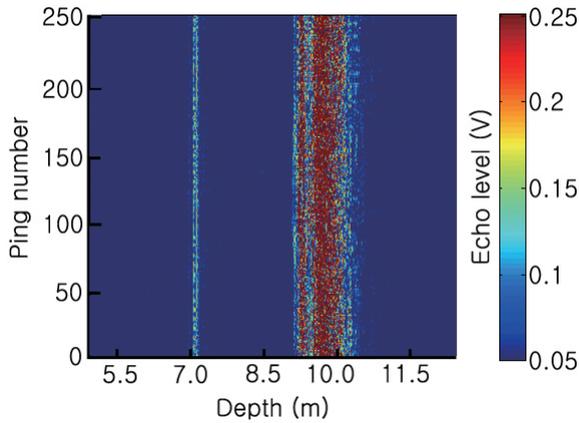


Fig. 4. An echogram for the low frequency channel (35-75 kHz) measured from a WC (tungsten carbide sphere with 6% cobalt binder) sphere (Dia. 40 mm) suspended just below the chirp transducer to test the functionality of the developed chirp data acquisition and processing system.

Fig. 5 및 Fig. 6의 결과를 도출하였다. 이 때문에 저주파수 및 고주파수 대역에 대한 모든 echo 응답특성이 매우 명료한 패턴으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 먼저, 저주파수 대역에 대한 echo 응답특성을 살펴보면, 본 연구에서 설계, 개발한 chirp 데이터 수록 및 처리 시스템에서 펄스 폭 1.0 ms, 주파수 대역폭 20-220 kHz의 송신 chirp 펄스신호가 송출될 때, 표준구로부터 지속시간 약 0.1 ms, 주파수 대역 폭 35-75 kHz의 시간-주파수 echo 응답신호가 수신되었다. 즉, chirp 송·수파기의 저주파 채널의 주파수 대역과 완전하게 일치하는 시간-주파수 응답 패턴이 추출되었다. 또한, 고주파수 대역에 대한 echo 응답특성을 살펴보면, Fig. 4의 표준구로부터 수신된 echo 신호에 대한 응답지속시간과 응답주파수 대역폭은 각각 약 0.7 ms, 100-210 kHz이었다. 즉, chirp echo 신호의 시간-주파수 이미지 패턴은 이들 응답 시간 구간과 응답 주파수 대역폭 구간에서 선형적으로 증가하는 패턴을 나타내었다. 또한, 3차원 echo 이미지의 contour 패턴 역시 응답 주파수 대역 내에서 Fig. 6의 (b)에 나타난 응답 스펙트럼의 변동특성이 매우 충실하게 반영되고 있음

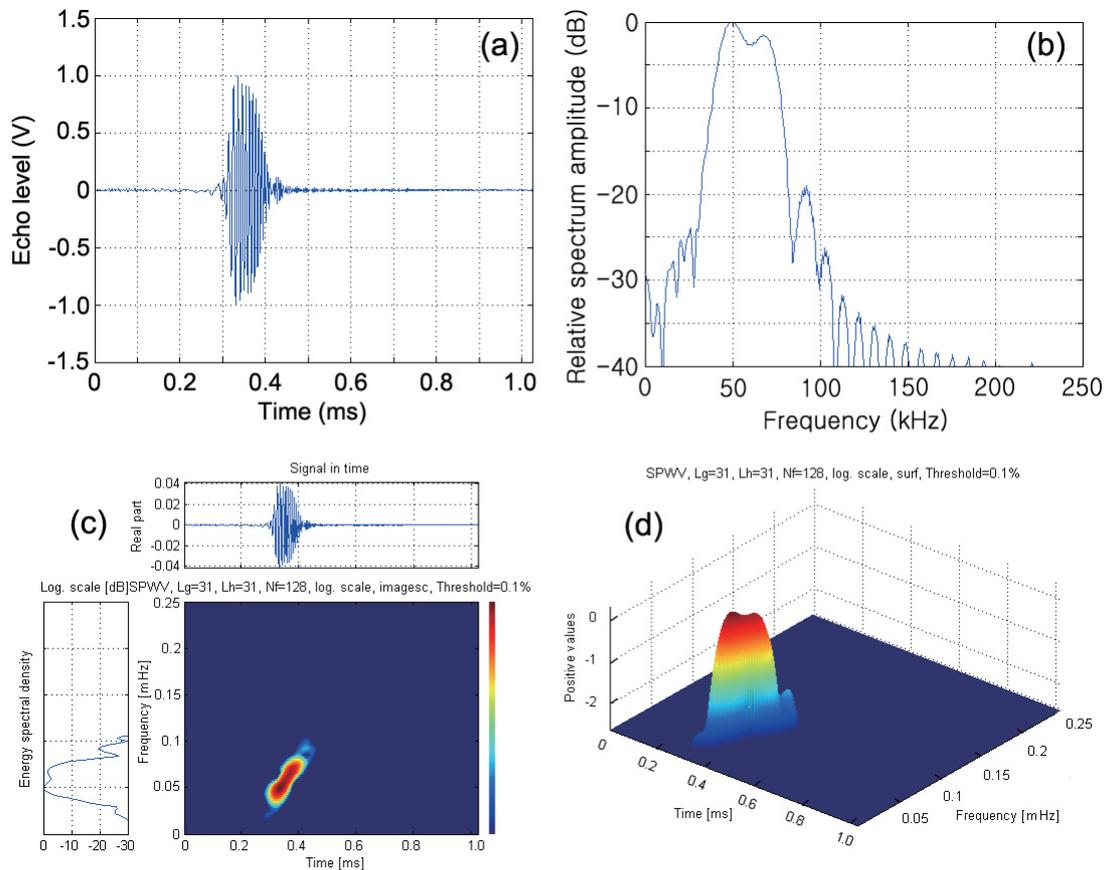


Fig. 5. Time response waveform (a), frequency spectrum (b), time-frequency image (c) and 3D contour plot (d) of the broadband echo signal from a 40 mm WC (tungsten carbide sphere with 6% cobalt binder) sphere suspended at about 3 meters depth on the beam axis just below the chirp transducer operating over the range of 35-75 kHz.

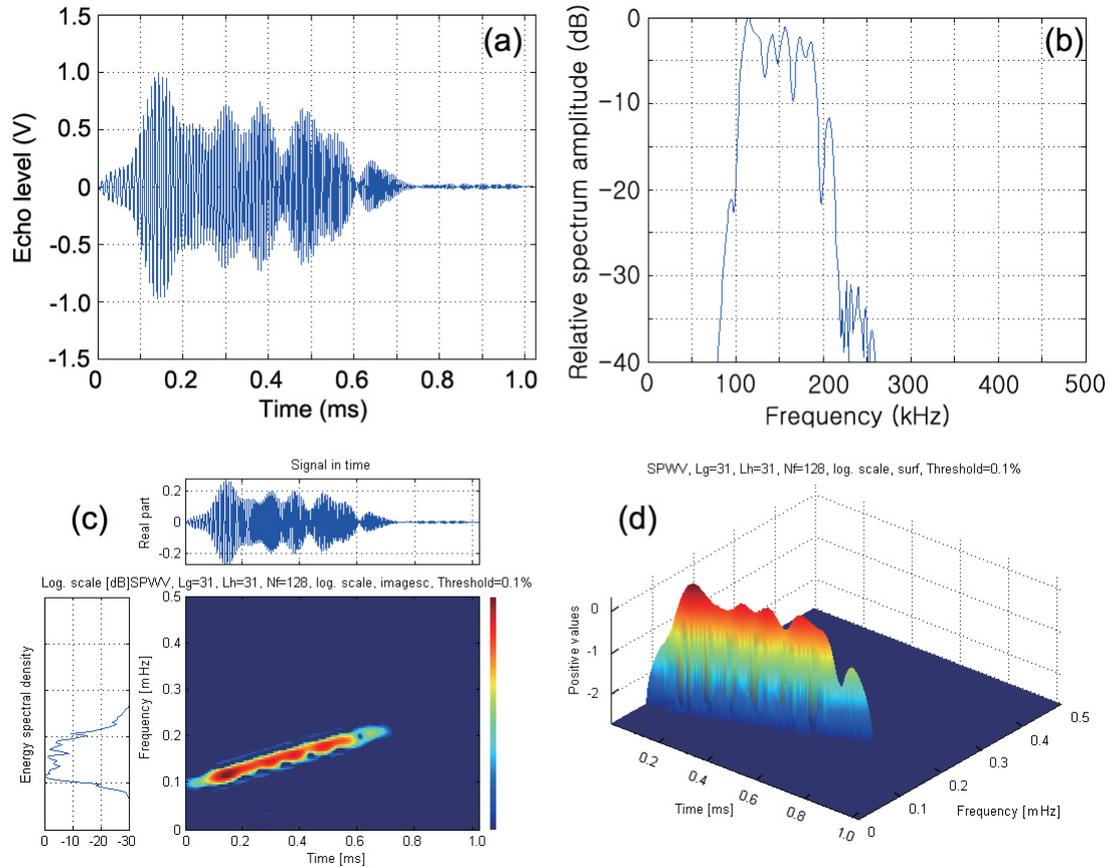


Fig. 6. Time response waveform (a), frequency spectrum (b), time-frequency image (c) and 3D contour plot (d) of the broadband echo signal from a 40 mm WC (tungsten carbide sphere with 6% cobalt binder) sphere suspended at about 3 meters depth on the beam axis just below the chirp transducer operating over the range of 130-210 kHz.

을 알 수 있었다. Fig. 5와 Fig. 6에서 저주파수 및 고주파수 채널에 대한 chirp rate를 비교해 보면, 저주파수 대역에서는 400 kHz/ms이었고, 고주파수 대역에서는 약 157 kHz/ms로서, 고주파수 대역에 대한 echo 응답특성의 변화율이 매우 완만하게 변화하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 FPGA 모듈에서 고주파수 채널에 대한 송신 chirp 펄스 신호에 대한 시간-주파수 변화율을 저주파 채널보다 매우 완만하게 설계한 것은 chirp 송수파기의 고주파 채널에 대한 주파수 대역폭을 최대한 활용하여 가능한 한 어중식별과 관련된 더 많은 음향산란정보를 획득하기 위함이었다. 지금까지 저주파수 채널의 35-75 kHz 주파수 대역에서 각 어중에 대한 다수의 개체어를 대상으로 음향산란특성을 분석, 고찰한 결과, 이들 주파수 대역내에서의 어중식별인자를 포함하는 echo 응답특성의 변동패턴이 매우 완만하여 각 어중 고유의 특징적인 응답패턴을 추출하는 데 많은 어려움이 있었다. 따라서, 이와 같은 저주파수 및 고주파수 채널에 대한 응답특성을 상호 보완적으로 융합시켜 분석하면, 본 연구

에서 설계, 개발한 chirp 데이터 수록 및 처리 시스템은 현장에서 어중식별을 위한 각 어중 고유의 시간-주파수 echo 이미지를 수집하는 데 매우 유효하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

어군의 시간-주파수 echo 응답특성

본 연구에서 설계, 개발한 chirp 데이터 수록 및 처리시스템을 사용하여 수록한 어군의 echo 응답특성을 분석, 고찰한 결과의 일례는 Fig. 7과 같다. Fig. 7의 (a)는 부산 북항의 제 5부두에서 수록한 echogram을 나타낸 것으로서, 해저에 밀착되어 분포하는 어군으로부터의 echo 응답도 함께 수록되었다. 한편, Fig. 7의 (b)는 Fig. 7의 (a)에 나타낸 25번째 sonar ping에 대한 chirp echo 응답신호이고, Fig. 7의 (c)는 Fig. 7의 (b)에 나타낸 echo 응답신호에 대한 2차원 시간-주파수 이미지 패턴을 나타낸 것이다.

본 연구에서 개발한 chirp 데이터 수록 및 처리 시스템을 사용하여 어중의 식별과 관련된 생물학적 및 음향학적 정보를 추출하는 데 있어 가장 주목하고 있는 점은 각 어중생물로부터의

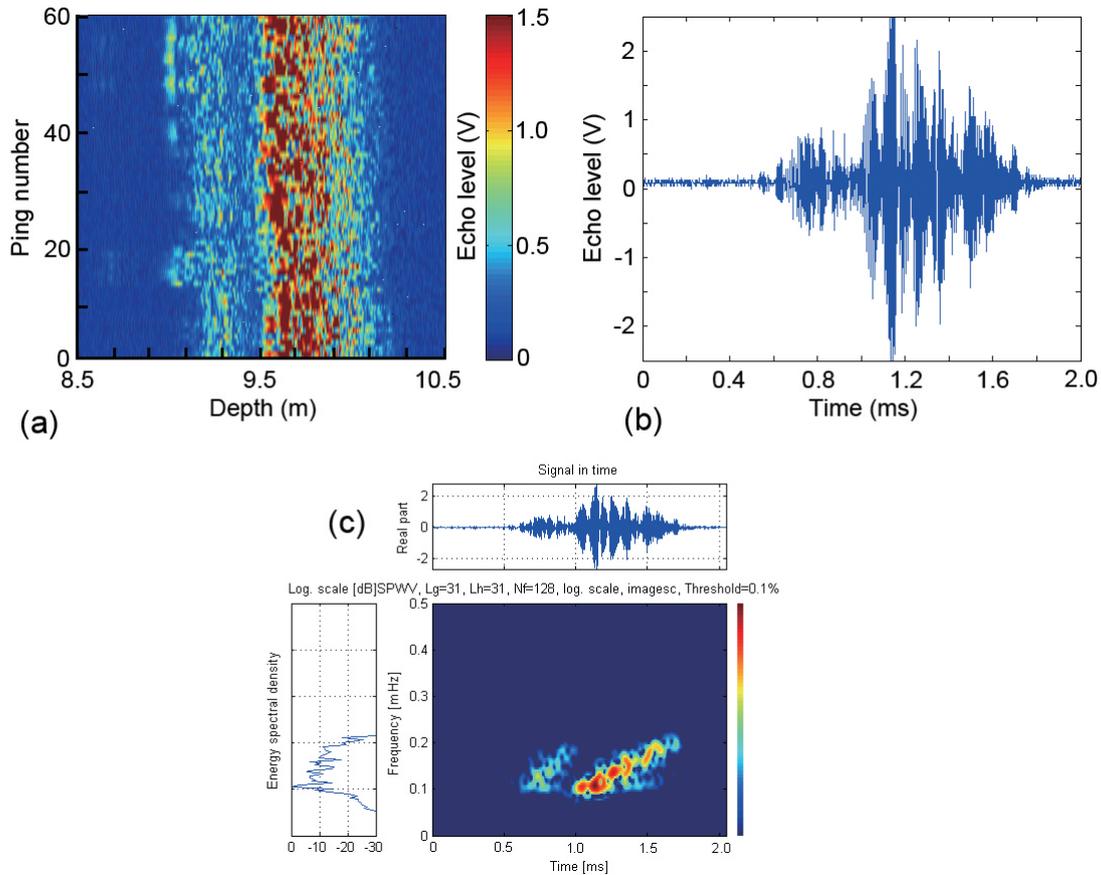


Fig. 7. Expanded echogram (a), chirp echo waveform (b) and time-frequency image (c) for the broadband echo signal from seabed. The echo signal from fish aggregations near the seabed was acquired over the frequency range of 130-210 kHz in the Busan northern harbor, Korea. The time-frequency image show that it is possible to separate and resolve the two echo signals if their time components for the echo signals from seabed and fish do not overlap in the time domain.

echo 응답신호성분에는 각 어종 고유의 특징적인 식별정보가 내포되어 있다는 점이다. 그러나, 이들 어종 의존적인 식별정보를 어떻게 추출할 것인가에 대해서는 아직 분명한 식별기법이 개발되어 있지 않은 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 Fig. 7의 (c)에서와 같이 어군으로부터 수록한 echo 응답신호의 시간 영역과 주파수 영역에 대한 echo 성분을 통합하여 해석할 수 있는 시간-주파수 이미지 패턴에 주목하였다. 즉, Fig. 7의 (c)에서 해석에 대한 echo 응답신호의 시간-주파수 이미지 패턴은 어군의 시간-주파수 이미지 패턴과 선명하게 분리되어 나타나고 있다. 따라서, 이 시간-주파수 이미지 패턴으로부터 어군의 이미지 패턴만을 분리하여 추출할 수 있다면, 각 어군 고유의 echo 응답 이미지 패턴에 대한 데이터 베이스를 작성할 수 있다. 또한, 이렇게 구축된 다수 어종에 대한 이미지 데이터 베이스를 활용하면 미지의 어족생물로부터 얻어지는 이미지 패턴으로부터 탐지 어종을 추적 및 식별할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 개발한 chirp 데이터 수록 및 처리 시스템은 이를 위한 목적으로

설계, 개발되었지만, 아직 여러 개선해야 할 점이 많아 향후 지속적으로 개량, 발전시킬 예정이다.

사 사

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2017년)에 의하여 연구되었음.

References

- Baska J and Sedlacek M. 2001. Use of the intergral transforms for estimation of instantaneous frequency. *Meas Sci Rev* 1, 169-172.
- Cowell DMJ and Freear S. 2010. Separation of overlapping linear frequency modulated (LFM) signals using the Fractional Fourier Transform. *IEEE Transactions on UFFC* 57, 2324-2333. <http://dx.doi.org/10.1109/TUFFC.2010.1693>.

- Digilent. 2011. Digilent Nexys2 Board Reference Manual. Digilent Inc, Pullman, WA, U.S.A., 1-17.
- 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.
- Fässler SMM, Fernandes PG, Semple SIK and Brierley AS. 2009. Depth-dependent swimbladder compression in herring *Clupea haengus* observed using magnetic resonance imaging. *J Fish Bio* 74, 296-303. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1095-8649.2008.02130.x>.
- Fernandes PG. 2009. Classification trees for species identification of fish-school echotraces. *ICES J Mar Sci* 66, 1073-1080. <http://dx.doi.org/10.1093/icesjms/fsp060>.
- 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.
- 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://dx.doi.org/10.2478/msr-2014-0045>.
- Han SK and Kim HT. 2010. Efficient radar target recognition using a combination of range profile and time-frequency analysis. *Progress Electrom Res* 108, 131-141. <http://dx.doi.org/10.2528/PIER10071601>.
- 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 Physic Oceanography* 16, 1997-2012.
- 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 and Lee WS. 2010. Design, fabrication and performance characteristics of a 50kHz Tonpilz type transducer with a half-wavelength diameter. *J Korean Soc Fish Tech* 46, 173-183. <http://dx.doi.org/10.3796/KSFT.2010.46.2.173>.
- 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. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2011.0413>.
- Lee DJ. 2011. Estimation of angular location and directivity compensation of split-beam acoustic transducer for a 50 kHz fish sizing echo sounder. *Korean J Fish Aquat Sci* 44, 423-430. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2011.0423>.
- 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. <http://dx.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. <http://dx.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. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2015.0207>.
- Lee DJ. 2015a. 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. <http://dx.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. <http://dx.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. *Korean J Fish Aquat Sci* 49, 214-223. <http://dx.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. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2016.0224>.
- Lee DJ. 2017. Bandwidth improvement of a multi-resonant broadband acoustic transducer. *Korean J Fish Aquat Sci* 50, 605-615. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2017.0605>.
- Shui PL, Shang HY and Zhao YB. 2007. Instantaneous frequency estimation based on directionally smoothed pseudo-Wigner-Ville distribution bank. *IET Radar Sonar Navig* 1, 317-325. <http://dx.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.
- 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. <http://dx.doi.org/10.1093/icesjms/fsp262>.