

50 kHz Split Beam 데이터 수록 및 처리 시스템의 성능특성

이대재*

부경대학교 해양생산시스템관리학부

Performance Characteristics of a 50-kHz Split-beam Data Acquisition and Processing System

Dae-Jae Lee*

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

The directivity characteristics of acoustic transducers for conventional single-beam echo sounders considerably limit the detection of fish-size information in acoustic field surveys. To overcome this limitation, using the split-aperture technique to estimate the direction of arrival of single-echo signals from individual fish distributed within the sound beam represents the most reliable method for fish-size classification. For this purpose, we design and develop a split-beam data acquisition and processing system to obtain fish-size information in conjunction with a 50-kHz single-beam echo sounder. This split-beam data acquisition and processing system consists of a notebook PC, a field-programmable gate array board, an external single-transmitter module with a matching network, and four-channel receiver modules operating at a frequency of 50-kHz. The functionality of the developed split-beam data processor is tested and evaluated. Acoustic measurements in an experimental water tank showed that the developed data acquisition and processing system can be used as a fish-sizing echo sounder to estimate the size distribution of individual fish, although an external single-transmitter module with a matching network is required.

Keywords: Split-beam processor, Data acquisition and processing system, Direction of arrival (DOA), PC-based echo-sounder system, Fish size estimation

서론

우리나라 주변수역에서 조업하는 대부분의 연근해 어선에 탑재되어 있는 어군탐지기는 하나의 음향변환기를 사용하여 음향펄스신호를 송·수신하는 single beam 어군탐지기이다. 이들 어군탐지기를 통해서 파악할 수 있는 어로정보는 주로 어군의 소재심도와 군집패턴, 해저 장애물의 존재여부 및 어군의 상대적인 분포밀도 등이다. 따라서, 어로현장에서 single beam 어군탐지기를 사용하여 어족생물의 체장분포를 실시간으로 탐지하여 어느 체장 이상의 어류만을 선택적으로 어획하는 것은 불가능하다. 현재, 세계 각 국에서는 어족생물의 체장 조성을 어로현장에서 직접 측정하기 위한 목적으로 split beam 어군탐지기가 널리 사용되고 있다. 이들 split beam 어군탐지기에서는 다수의 초음파 진동소자를 4개의 블록으로 나누어 배열한 음향

변환기를 사용한다(Lee and Shin, 2001; Lee, 2011; Lee and Lee, 2011). 즉, 송신시에는 4개의 모든 진동자 블록을 동시에 구동하여 측엽(side lobe) 레벨이 억제된 음향펄스신호를 해중으로 발사한다. 반면, 수신시에는 4개의 진동자 블록을 서로 독립적으로 사용하여 어족생물로부터 산란된 echo 신호를 각각 수신한다. 이와 같은 split beam 신호처리기술을 이용하면, 음향 빔 내부에 분포하는 어족생물로부터 산란되는 echo 신호의 음축에 대한 방향각(target angle), 즉, 도래방향(direction of arrival, DOA)을 추정할 수 있다(Levanon, 1988; Burdic, 1991; Mahafza, 1998). 따라서, 이들 echo 신호의 도래방향에 대한 정보를 이용하여 지향성 보정을 수행하면, 어족생물의 반사강도를 측정할 수 있고, 또한, 반사강도의 체장 의존성 패턴으로부터 어군에 대한 체장조성을 추정할 수 있다. 본 연구에서는 이와 같은 split beam 신호처리기술을 우리나라 연근해 어선에 널

*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.2021.0798>

Korean J Fish Aquat Sci 54(5), 798-807, October 2021

Received 2 September 2021; Revised 24 September 2021; Accepted 27 September 2021

저자 직위: 이대재(교수)

리 탑재되어 있는 50 kHz의 single beam 어군탐지기에 접목시켜 선택적 어업을 실현하는데 필요한 어족생물의 체장분포를 추정하기 위한 어군탐지시스템을 실험적으로 구축하였다. 여기서는 FPGA (field-programmable gate array) 모듈(Digilent, 2011; Lee, 2018)을 사용하여 split beam echo 데이터 수록 및 처리 시스템을 설계, 개발하고, 이 시스템의 성능특성을 실험적으로 평가, 분석한 결과에 대하여 보고한다.

재료 및 방법

Split beam 데이터 수록 및 처리 시스템의 설계

본 연구에서 설계, 개발한 split beam 데이터 수록 및 처리 시스템의 작동 계통도는 Fig. 1과 같다. 본 연구에서는 FPGA 모듈(Digilent, 2011)을 사용하여 split beam 데이터 수록 및 처리 시스템을 설계, 개발하였는데, 여기에 사용한 FPGA 모듈은 Nexys 2 board (Spartan-3E FPGA 1200K; Xilinx, San Jose, CA, USA)이다(Lee, 2018). 이 Nexys 2 board에는 VGA (video graphics array), RS232, USB2, PS2, LED, 고속확장 커넥터, PMOD (peripheral module) 커넥터, 5V 전원 및 신호 발생기(clock generator) 등이 탑재되어 있다. Fig. 1에 나타난 split beam 데이터 수록 및 처리 시스템의 작동은 종래의 single beam 어군탐지기로부터 trigger 동기신호가 FPGA 모듈에 입력되어 전기적인 초음파 펄스신호가 정합회로(matching network)를 통해 split beam 음향변환기에 공급되면서부터 개시된다. 이 때, FPGA 모듈에서는 외부의 single beam 어군탐지기로부터 공급받은 trigger 신호를 기준으로 TVG (time varied gain) 증폭기의 구동을 위한 제어신호를 출력시킨다. 이 제어신호가 4개의 6핀(pin) PMOD I/O 인터페이스를 통해 4채널의 전치증폭기 모듈에 입력되면, split beam 음향변환기의 UL (upper left), UR (upper right), DL (down left) 및 DR (down right) 진동자 블록으로부터 수신되는 echo 신호의 TVG 증폭 및 양자화가 개시된다. 어군에 대한 echo 신호의 수록과 해석은 음향 빔 내에 존재하는 어류로부터 산란된 echo 신호가 split beam 음향변환기의 4개의 분할된 진동자 그룹에 각각 수신되면서부터 FPGA 모듈과 접속된 노트북 PC (Dell inspiron, Dell, Round Rock, TX, USA) 상에서 이루어진다. 이를 위해 split beam processor의 소프트웨어 모듈에서는 4채널의 echo 신호에 대한 대역 필터링, 전치증폭, TVG 증폭 및 A/D 변환기의 구동에 의한 양자화 데이터의 입력 및 표시, 어류의 위치각 검출 등의 연산처리 등을 실시간으로 수행한다. 본 연구에서 사용한 A/D 변환기는 12 bit의 ADC7476 (SOT-23-6 package; Texas Instruments, Dallas, TX, USA)으로서 최대 샘플링 주파수는 1 MHz이지만, Fig. 1의 split beam 데이터 수록 및 처리 시스템에서는 샘플링 주파수를 200 kHz로 설정하였다. Fig. 1에 나타난 정합회로는 일반 어선에 탑재된 single beam 어군탐지기의 전기출력 임피던스와 본 연구에서 실험적으로 설계, 제작한

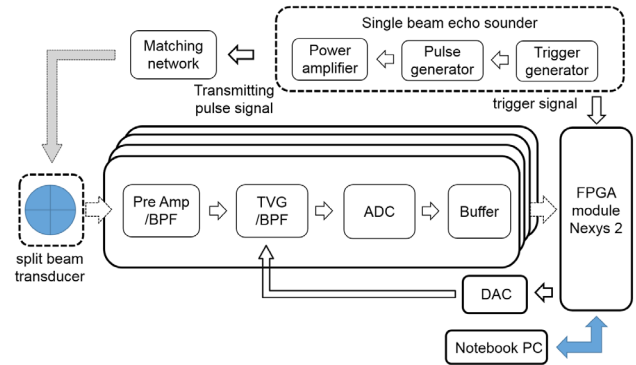


Fig. 1. Schematic diagram of the split-beam data acquisition and processing system for measuring and analyzing the acoustic echoes from fish targets. The system consists of a FPGA, four receiver modules composed of four channel TVG amplifiers and A/D converter modules, an external transmitter module with a matching network, and a self-made split-beam transducer. 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. BPF, bandpass filter; ADC, analog-to-digital converter; DAC, digital-to-analog converter; FPGA, field-programmable gate array; TVG, time varied gain.

Table 1. Specifications of hardware modules consisting of the split-beam 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 stratflash ROM 50 MHz oscillator
Transmitting module	Output pulse signal 50 kHz
	Output power 100 W
	Pulse duration 0.5-1.0 ms (variable)
Receiving module	4 channels
	TVG gain 96.8 dB (0.48 dB step)
	ADC 12 bits 1 MHz sampling
	Pre-amp gain 24 dB Bandpass filter 30-70 kHz DAC 16 bits 5V output
Split beam transducer	Self-made split-beam transducer (50 kHz)
Note book PC	Dell inspiron (2.53 GHz, windows 7, core i5)

FPGA, field-programmable gate array; VGA, video graphics array; PS/2, personal system/2; TVG, time varied gain; ADC, analog-to-digital converter; DAC, digital-to-analog converter.

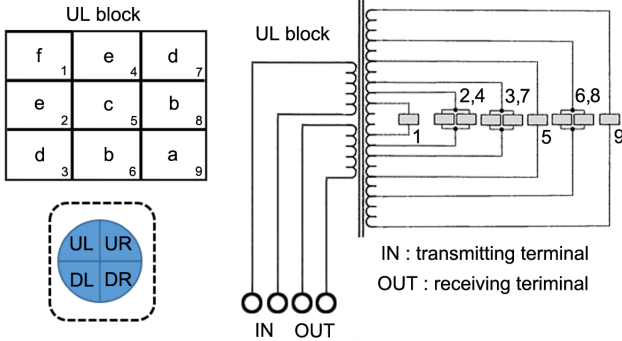


Fig. 2. Block diagrams showing the electrical connection of transmitting and receiving terminals with a weighting transformer and nine transducer elements consisting of the UL quadrant of a split-beam transducer. The output for four quadrants of the split-beam transducer provides information on the fish orientation. UL, upper left; UR, upper right; DL, down left; DR, down right.

split beam 음향변환기의 전기입력 임피던스를 서로 정합시키기 위한 모듈이다.

Split beam 음향변환기의 설계 및 제작

본 연구에서는 Fig. 1의 split beam 데이터 수록 및 처리 시스템에서 사용하기 위한 split beam 음향변환기를 실험적으로 직접 설계, 제작하였다. Split beam 음향변환기의 진동소자에 대한 배열 모식도와 최적의 지향성 패턴을 도출하기 위해 설계한 진폭가중회로(amplitude weighting transformer)의 모식도는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 split beam 음향변환기는 서로 전기적으로 분리된 4개의 진동자 블록, 즉, UL, UR, DL 및 DR 블록으로 구성되는데, 여기서는 그 중에서 UL 블록에 대한 진동자 배열패턴만을 나타내었다. UL 진동자 블록은 9개의 진동소자로서 구성되는데, 각 진동소자에는 single beam 어군탐지기로부터 전송되는 전기펄스신호를 정합회로에서 동조(tuning)시킨 후, 진폭가중치를 a에서 f까지 6개의 단계로 차등화하여 공급하였다. 즉, split beam 음향변환기의 4개의 진동자 블록(quadrant)에 각각 1개씩 내장되어 있는 가중회로를 이용하여 제1의 측엽(side lobe) 레벨이 -20 dB 이하가 되도록 조절하였다.

이 때, Fig. 2에서 4개의 진동자 블록을 서로 전기적으로 결합시킨 split beam 음향변환기의 중심부근에 위치하는 9번 진동소자에는 가장 높은 레벨의 진폭 가중치(레벨 a)를, UL 블록의 중앙에 위치한 5번 진동소자에는 중간레벨의 진폭 가중치(레벨 c)를, 또한, 가장 바깥쪽에 위치하는 1번 진동소자에는 가장 낮은 레벨의 진폭 가중치(레벨 f)를 공급하였다. 같은 방법으로 UR, DL 및 DR 블록에 대해서도 같은 진폭가중치를 부여한 후, 이들 4개 블록을 동시에 병렬 구동하여 송신 빔 패턴을 생성하였다. 한편, split beam 내에 존재하는 어류로부터 산란되는

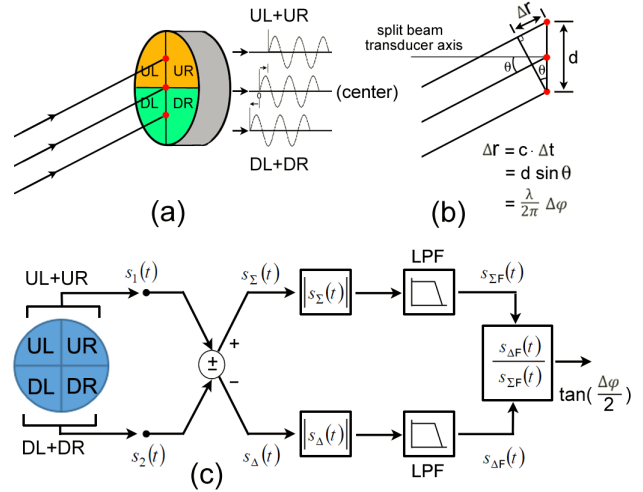


Fig. 3. Conceptual diagram for estimating the target angle by the phase comparison monopulse technique in the split-beam echo sounder. (a) Time delay of echo signals due to target angle for two quadrants (UL+UR, DL+DR), (b) Relationship among time difference, electrical phase difference and target angle for two quadrants (UL+UR, DL+DR), (c) Data processing model for target angle measurement. LPF, lowpass filter; UL, upper left; UR, upper right; DL, down left; DR, down right.

echo 신호는 4개의 진동자 블록을 독립적으로 사용하여 수신하고, 이것을 각각 split beam processor의 UL, UR, DL 및 DR 진동자 블록에 대한 수신모듈에 입력하였다. 본 연구에서 사용한 가중 transformer는 P36/22 pot core (H5A; Tokin, Shiroishi, Japan)로서, 그 외경과 높이는 각각 36 mm와 22 mm이다.

어류 echo 신호의 전기적 위상각 및 방향각 추정

Fig. 1에 나타낸 split beam 데이터 수록 및 해석 시스템에서 어류 echo 신호의 전기적 위상각 및 방향각을 추정하는데 이용한 알고리즘의 모식도는 Fig. 3과 같다. Fig. 3a와 Fig. 3b는 split beam 음향변환기의 중심, UL+UR 및 DL+DR 진동자 그룹에 각각 도래하는 echo 신호, 또한, 이들 신호 상호간의 도래 시간차를 나타낸 모식도이다. Fig. 3b에서 UL+UR과 DL+DR 진동자 그룹 사이의 음향중심간격을 d , echo 신호의 도래 시간차를 Δt , 수중음속을 c , 사용파장을 λ , 이들 2개의 진동자 그룹에 수신되는 echo 신호를 각각 $S_1(t)$, $S_2(t)$, 두 신호 사이의 전기적인 위상각을 $\Delta\phi$ 라 하면, 그 거리차 Δr 은 (1)식에 의해 구할 수 있다.

$$\Delta r = c \cdot \Delta t = d \sin \theta = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\phi \dots \dots \dots (1)$$

$$s_1(t) = A_1 e^{j(\omega t - \frac{\Delta\phi}{2})} \dots \dots \dots (2)$$

$$s_2(t) = A_2 e^{j(\omega(t + \frac{\Delta t}{2}))} \dots \dots \dots (3)$$

$$s_{\Sigma}(t) = s_1(t) + s_2(t) = A e^{j\omega t} (2 \cos(\frac{\Delta\phi}{2})) \dots \dots \dots (4)$$

$$s_{\Delta}(t) = s_1(t) - s_2(t) = A e^{j\omega t} (-2j \sin(\frac{\Delta\phi}{2})) \dots \dots \dots (5)$$

이들 (2)식-(5)식에서 ω 는 각주파수($\omega = 2\pi f$; f , 주파수), j 는 복소수, t 는 시간이다.

본 연구에서는 Fig. 3c에 나타난 위상비교 모노펄스기법 (phase comparison monopulse technique)을 이용하여 어류의 위치각을 측정하는 이론적인 모델을 구축하였다(Levanon, 1988; Burdic, 1991; Mahafza, 1998). 즉, 위상비교 모노펄스기법은 split beam 음향변환기의 선수미 방향과 좌우 정횡 방향으로 각각 양분되어 있는 2개의 진동자 그룹(UL+UR과 DL+DR 그룹, UL+DL과 UR+DR 그룹)에 수신되는 어류 echo 신호의 진폭은 서로 같고, 위상이 서로 다른 경우에 적용할 수 있는 효과적인 기법이다(Mahafza, 1998). 그러나, 만일 각 진동자 그룹에 수신되는 어류 echo 신호의 진폭이 서로 다르고, 위상이 서로 같은 상황이라면 진폭비교 모노펄스기법(amplitude comparison monopulse technique)을 이용하여야 한다(Burdic, 1991; Mahafza, 1998). 본 연구에서는 split beam 어군탐지기의 좌우 정횡 방향과 선수미 방향에 대한 한 쌍의 진동자 그룹에 수신되는 어류 echo 신호의 진폭이 서로 같다($A_1 = A_2 = A$)는 가정하에서 위상비교 모노펄스기법을 바탕으로 선수미 및 정횡 방향에 대한 어류의 위치각(θ) 추정에 필요한 echo 신호의 전기적인 위상각 $\Delta\phi$ 를 (6)식에 의해 추정하였다.

$$F = \frac{s_{\Delta}(t)}{s_{\Sigma}(t)} = \tan(\frac{\Delta\phi}{2}) \dots \dots \dots (6)$$

Fig. 3c에서 $s_{\Sigma}(t)$ 과 $s_{\Delta}(t)$ 은 각각 UL+DL과 UR+DR 진동자 그룹에 각각 수신되는 echo 신호의 합 $[S_1(t) + S_2(t)]$ 과 차 $[S_1(t) - S_2(t)]$ 의 신호를 나타낸 것이다. 따라서, split beam 내에 위치하는 어류의 음축에 대한 방향각 θ 는 (1)식-(6)식에 나타난 파라미터를 이용하여 (7)식으로부터 의해 추정할 수 있다.

$$\theta = \sin^{-1} [\frac{\lambda}{\pi d} \tan^{-1} (\frac{s_{\Delta}(t)}{s_{\Sigma}(t)})] \dots \dots \dots (7)$$

Fig. 3c에서 UL+DL과 UR+DR 진동자 그룹에 각각 수신된 2개의 echo 신호 사이의 전기적인 위상각으로부터 추정된 좌우 정횡방향에 대한 어류의 방향각을 θ_1 , UL+UR과 DL+DR 진동자 그룹으로부터 각각 수신된 2개의 echo 신호 사이의 전기적인 위상각으로부터 추정된 선수미 방향에 대한 방향각을 θ_2 라 할 때, 음축에 대한 어류 echo 신호의 합성 방향각, 즉, 도래각(direction of arrival, DOA) θ_c 는 (8)식에 의해 구할 수 있다.

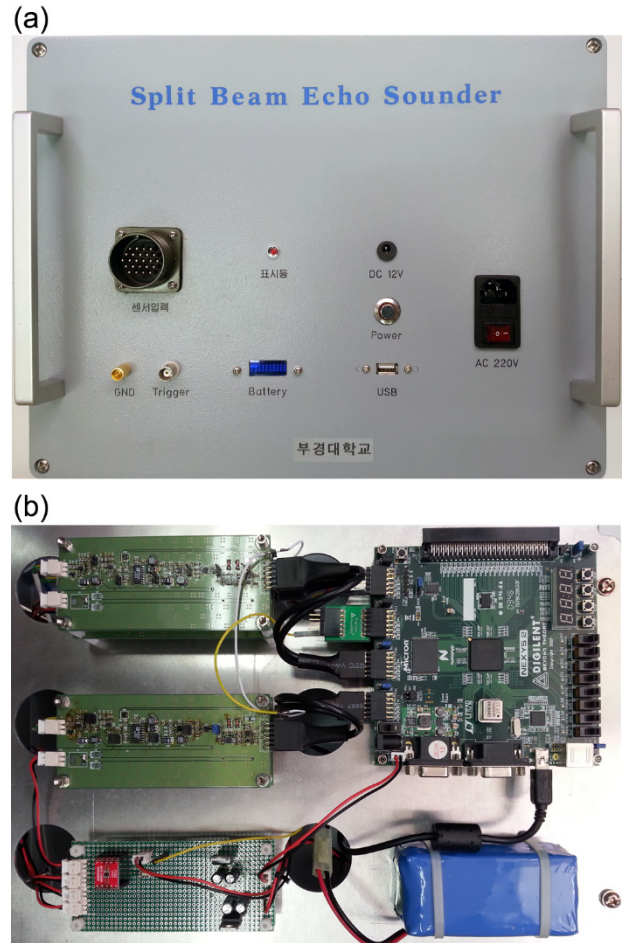


Fig. 4. Photographs of the split-beam data acquisition and processing system developed in this study. (a) A completed PC-based split-beam echo-sounder, (b) An FPGA (field-programmable gate array) board connected to four receiver modules and an additional data control module including a battery pack.

$$\theta_c = \sqrt{\theta_1^2 + \theta_2^2} \dots \dots \dots (8)$$

본 연구에서 개발한 split beam processor의 소프트웨어 모듈에서는 (8)식에 나타난 좌우 정횡 및 선수미 방향에 대한 어류의 방향각 θ_1 과 θ_2 를 실시간으로 산출하여 나타내었다.

결과 및 고찰

split beam 데이터 수록 및 처리 시스템의 성능특성

본 연구에서 설계, 개발한 split beam 데이터 수록 및 처리 시스템의 하드웨어 부분은 Fig. 4와 같다. Fig. 4a는 본 연구에서 개발된 split beam processor의 실제 사진이고, Fig. 4b는 Fig. 4a의 내부에 장착된 하드웨어 모듈로서, 이것은 FPGA 보드

(board)에 4개 채널의 TVG 내장 수신모듈과 전원 인터페이스 모듈, 또한, 배터리 팩(pack) 모듈 등으로 구성된 시스템이다. Fig. 4a에는 split beam 음향변환기의 접속 커넥터, 전원입력 커넥터, 각종 기능 표시등과 하드웨어 시스템을 구동하기 위한 USB 접속 커넥터 등이 장착되어 있다.

본 연구에서 개발한 Fig. 4의 split beam 데이터 수록 및 처리 시스템은 Fig. 1의 모식도에 나타난 바와 같이 50 kHz의 고정된 주파수에서 동작하지만, 이 주파수의 송신펄스신호에 대한 송신출력, 펄스 폭 및 펄스반복주기 등은 전적으로 외부의 single beam 어군탐지로부터 공급받도록 설계되었다. Fig. 4b에 나타난 4개 채널의 수신부 전단에 대한 전치증폭기의 이득은 0-40 dB 범위에서 조정가능하고, TVG 증폭기는 no-TVG, 10 log(r), 20 log(r), 30 log(r), 40 log(r) 중에서 사용자가 선택할 수 있도록 하였다. 어류 echo 신호의 시간 파형과 위치각 정보 등의 수록은 USB 인터페이스를 통해 255 ping에 대한 데이터 블록을 1개의 파일로서 작성하여 하드 디스크에 저장할 수 있도록 하였다. 이 때, 어류의 echo 신호에 대한 정형 방향과 선수미 방향에 대한 위치각 정보는 각각 cursor를 이용하여 사용자가 직접 추적할 수 있도록 하였다. 한편, 이와 같이 수록된 echo 신호의 보다 정량적인 분석은 동일한 window 상에서 데이터 파일 목록으로부터 희망하는 echo 신호를 호출하여 수행할 수 있도록 소프트웨어를 구축하였다.

Split beam 음향변환기의 송·수신 응답특성

본 연구에서 설계, 개발한 Fig. 4의 split beam 데이터 수록 및 처리 시스템에서 음향펄스신호의 송·수신에 사용하기 위한 split beam 음향변환기는 Fig. 5와 같다. Fig. 5의 split beam 음향변환기의 설계에 사용한 진동소자(C-21; Fuji ceramics corporation, Tokyo, Japan)는 공진주파수 50 kHz의 각주형 압전 소자로서, 그 길이(length, L), 폭(width, W), 가로 두께(T1), 세로 두께(T2)는 각각 30 mm, 13 mm, 14 mm, 9 mm이다. 본 연구에서는 Fig. 5a에서와 같이 이들 진동소자 36개를 9개씩 4분할하여 4개의 정방형의 진동자 블록을 형성하고, 이들 블록을 Fig. 2에서와 같이 UL, UR, DL 및 DR 진동자 블록의 위치에 배치한 후, 투명 우레탄을 사용하여 음향 window를 생성하였다. 또한, 이들 4개의 진동자 블록의 각각의 진동소자에 공급되는 전기펄스신호의 전압레벨을 Fig. 5b에 나타난 진폭가중회로를 사용하여 변화시킴으로써 음향변환기로부터 송출되는 음향 에너지의 지향성 패턴에 출현하는 제1의 측엽 레벨을 약 -19 dB 까지 억제시켰다. 이와 같이 설계, 제작된 split beam 음향변환기를 사용하여 UL, UR, DL 및 DR 진동자 블록에 수신되는 어류 echo 신호를 수록하고, UL+DL과 UR+DR, 또한, UL+UR과 DL+DR의 좌우 정형 방향과 선수미 방향에 대한 echo 신호의 전기적인 위상각 $\Delta\phi$ 를 측정하였다. 이렇게 측정된 위상각 정보들을 이용하여 (7)식에 의한 어류의 방향각 θ 를 추정하기 위해서는 진동자 블록 상호간의 음향중심간격 d 에 대한 정보가

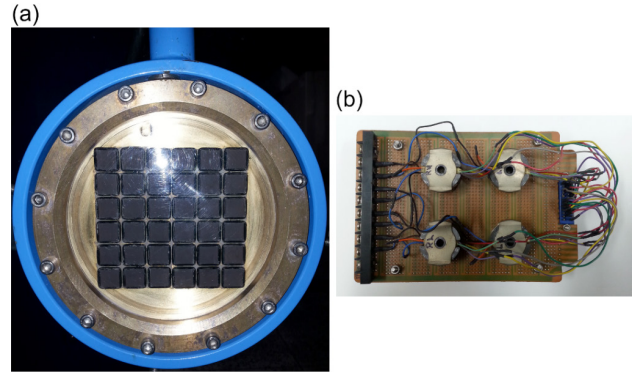


Fig. 5. Photographs for a completed split-beam transducer assembly divided into four sub-array quadrants of 3×3 transducer elements (a) and four-amplitude weighting transformers installed on the PCB (printed circuit board) (b). An acoustic wave front propagating towards each quadrant composed of nine transducer elements arrives at different times and at the four quadrants causing the phase angle of the electrical output signal. One angle (alongships) is determined from the electrical phase difference between one set of receiving quadrant elements, and a second angle (athwartships) is estimated from the orthogonal quadrant elements. All four quadrants play a role as transmitters and transmit simultaneously, while they receive the backscattered signals independently.

필요하다. 이에 본 연구에서는 텅스텐 교정구[tungsten carbide sphere with 6% cobalt binder (WC), 직경 40 mm]를 사용하여 음향중심간격을 실험적으로 산출한 결과, 50 kHz의 주파수에 대한 파장(λ)의 약 1.5배, 즉, $d=1.5\lambda$ 로서 추정되었다.

한편, Fig. 5의 split beam 음향변환기에 대한 송신응답파형을 조사, 분석한 결과는 Fig. 6과 같다. 대형음향수조(L×B×D, 5×6×5 m)에서 Fig. 6a에 나타난 주파수 50 kHz, 펄스 폭(pulse width) 약 0.6 ms의 전기적인 펄스신호를 Fig. 5a의 split beam 음향변환기에 공급한 후, 음측상 약 3.5 m 위치에서 광대역 음향변환기(R206; Airmar Technology Corporation, Milford, NH, USA)를 사용하여 송파신호의 시간응답특성을 측정 한 결과는 Fig. 6b와 같다. Fig. 6b에서 알 수 있는 바와 같이 응답펄스신호의 상승구간과 하강구간에 대한 펄스신호의 지속시간이 약 0.15 ms로서 매우 짧아 본 연구에서 설계한 split beam 음향변환기에 대한 거리 분해능력은 매우 우수한 것으로 판단 된다.

한편, 본 연구에서 설계, 개발한 split beam 음향변환기의 송신 및 수신감도특성을 측정 한 결과는 Fig. 7 및 Fig. 8과 같다. 또한, split beam 음향변환기의 UL, UR, DL 및 DR 진동자 블록에 대한 수신펄스신호의 시간응답특성은 Fig. 9와 같다.

먼저, 본 연구에서 설계, 제작한 split beam 음향 변환기의 송파전압감도 TVR (dB re 1 $\mu Pa/V$)를 측정 한 결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 7a는 split beam 음향변환기에 30-100 kHz의 chirp

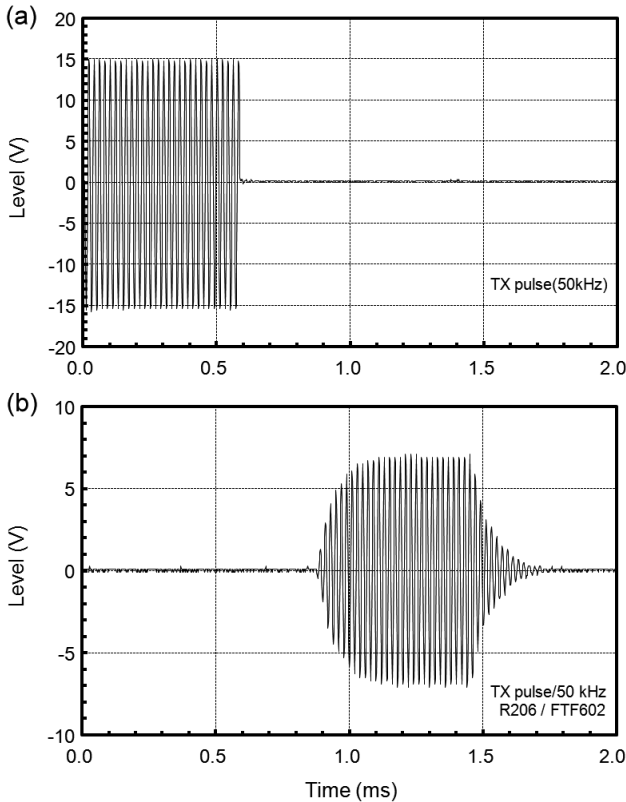


Fig. 6. Electrical driving pulse signal (a) and acoustic transmitting pulse signal (b) for a developed 50 kHz split-beam transducer.

펄스신호를 공급한 후, 그 송신펄스신호를 수중청음기(Model 8100; B&K, Nærum, Denmark)로 측정하여 도출한 시간-주파수 응답특성이다(Imberger and Boashash, 1986; Shui et al., 2007; Lee, 2015; Lee et al., 2016; Lee, 2018). 또한, Fig. 7b는 수중청음기에 의해 측정된 송신펄스신호로부터 계산한 송파전압감도의 주파수 의존성 패턴을 나타낸 결과이다. Fig. 7a에 나타난 시간-주파수 응답특성에는 시간응답파형과 주파수 스펙트럼을 함께 나타내었다. Fig. 7b에서 종축은 TVR (dB)이고, 횡축은 주파수(kHz)이다. Fig. 7에서 최대의 TVR을 나타내는 공진 주파수는 49.5 kHz이었고, 이 주파수에 대한 TVR 값은 176.2 dB이었다. 또한, -3 dB에 대한 상한 주파수 f_1 과 하한 주파수 f_2 는 각각 $f_1=52.0$ kHz, $f_2=47.5$ kHz로서, 송신모드에 대한 주파수 대역폭 Δf 는 $\Delta f=4.5$ kHz이었다. 따라서, 이들 값을 이용하여 계산한 split beam 음향변환기의 기계적 품질계수 (quality factor), 즉, 공진 예리도 Q 는 $Q=f_s/\Delta f=11.0$ 이었다.

한편, split beam 음향 변환기의 합성 수파감도, 즉, UL+UR+DL+DR 진동자 블록 전체에 대한 수파감도 SRT (dB re 1 V/ μ Pa)를 측정된 결과는 Fig. 8과 같다. Fig. 8a는 광대역 음향변환기(R206)에 30-100 kHz의 chirp 펄스신호를 공급한 후, 그 송신펄스신호를 split beam 음향변환기로서 측정하여 산출한 시간-주파수 응답특성이다. 또한, Fig. 8b는 split beam 음

향변환기에 의해 수신한 음향펄스신호로부터 계산한 수파감도의 주파수 의존성 패턴이다. Fig. 8a에 나타난 시간-주파수 응답특성에는 시간응답파형과 주파수 스펙트럼을 함께 나타내었다. Fig. 8b에서 종축은 SRT (dB)이고, 횡축은 주파수(kHz)이다. Fig. 8에서 최대의 SRT를 나타내는 주파수는 52.0 kHz 이었고, 이 주파수에 대한 SRT 값은 -179.8 dB이었다. 또한, -3 dB에 대한 상한 주파수 f_1 과 하한 주파수 f_2 는 각각 $f_1=54.5$ kHz, $f_2=50.0$ kHz로서, 수신 모드에 대한 주파수 대역폭 Δf 는 $\Delta f=4.5$ kHz이었다고, 그 공진 예리도 Q 는 $Q=f_s/\Delta f=11.6$ 이었다. 본 연구에서 설계한 split beam 음향변환기의 송신 및 수신 모드에 대한 주파수 대역폭은 모두 4.5 kHz이었지만, 최대의 송신전압감도 및 최대수신감도가 출현하는 주파수 사이에 약 2.5 kHz의 차이가 있었다. 따라서, 본 연구에서는 split beam processor의 수신모듈에 대한 대역필터의 중심주파수를 50 kHz로 설정하여 모든 신호처리를 수행하였다.

한편, split beam 음향변환기의 4분할된 수신 진동자 블록 UL, UR, DL 및 DR에 대한 수신펄스신호의 시간응답특성은 Fig. 9와 같다. Fig. 9에서 UL, UR, DL 및 DR 수신 진동자 블록에 대한 수신전압레벨은 각각 11.55, 11.75, 13.75 및 13.55 V로서, 각 진동자 블록의 수신전압레벨 사이에 약간의 차이가 있었다. 즉, UL과 UR의 진동자 블록의 수신레벨은 DL과 DR의 진동자 블록보다 약 2 V의 레벨저하가 발생하였다. 이들 수신레벨의 차는 split beam processor에 내장된 4채널의 수신모듈에 대한 전치증폭레벨을 미세 조정하여 보정하였다.

Split beam 음향변환기의 지향특성

본 연구에서 설계, 개발한 split beam 음향변환기의 정형 방향에 대한 지향성 패턴은 Fig. 10과 같다. Fig. 10에서 -3 dB 점에 대한 지향각은 14° 이었고, 첫 번째 측엽은 각각 -23° 와 24° 방향에서 출현하였는데, 이들의 측엽 레벨은 각각 -19.2 dB과 -19.3 dB이었다. Split beam 방식 체장어군탐지기의 가장 주된 기능은 주엽(main lobe)의 빔 내에 분포하는 개체의 반사강도를 측정하여 탐지어류에 대한 체장조성을 추정하는 것이다. 이 때문에 실시간으로 수신되는 echo 신호는 모두 주엽의 빔 내에 분포하는 개체로부터 산란된 응답신호라는 가정하에서 모든 연산처리가 이루어진다. 따라서, 이 가정이 성립되기 위해서는 측엽의 빔 속에 분포하는 개체로부터는 echo 신호가 수신되지 않도록 해야 한다. 이를 위해서는 split beam 음향변환기의 지향성 패턴에 출현하는 측엽 레벨을 적극적으로 억제시킬 필요가 있다. 본 연구에서는 제1의 측엽 레벨의 목표치를 -20 dB로 설정하여 가중회로를 설계하였지만, 실제의 측정치는 Fig. 10에서 알 수 있는 바와 같이 설계치 보다는 약간 큰 평균 -19.25 dB이었다.

Split beam processor의 성능 특성

본 연구에서 설계, 개발한 split beam 데이터 수록 및 처리 시스템의 구동 소프트웨어 기능에 대한 레이아웃(layout)은 Fig.

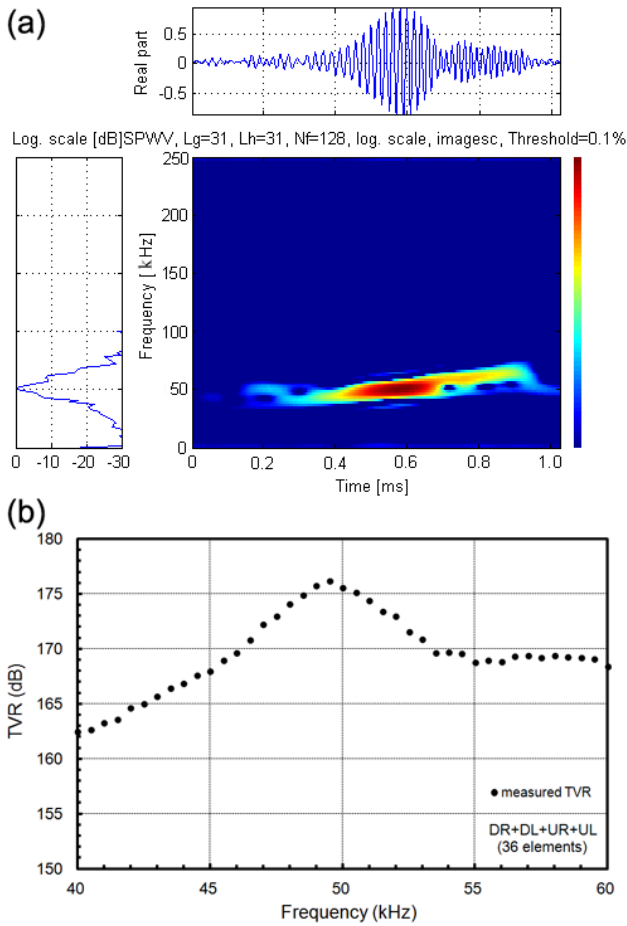


Fig. 7. Time-frequency response (a) and TVR (b) of a developed 50 kHz split-beam transducer. The time-frequency response was used to quantify the transmitting voltage response of the split-beam transducer. UL, upper left; UR, upper right; DL, down left; DR, down right; TVR, transmitting voltage response.

11과 같다. Fig. 11은 대형음향수조에서 텅스텐 교정구(WC; 직경 40 mm)를 사용하여 split beam processor의 각 기능을 평가, 분석한 결과의 일레이다. Fig. 11의 split beam processor는 trigger 펄스신호가 입력되면서부터 UL, UR, DL 및 DR 진동자 블록에 입력되는 echo 신호의 TVG 증폭과 A/D 샘플링, 또한, echo 신호의 도래각 추정 등의 기능이 작동한다. Fig. 11의 split beam processor는 기본적으로 데이터 수록 모드와 데이터 해석 모드로 그 기능이 이분화되어 있다. 먼저, 데이터 수록 모드는 software 모듈을 초기화시키고, 데이터의 입력선택 스위치를 split beam 음향변환기(TD)로 설정한 후, 소프트웨어 모듈의 각종 기능 파라미터를 설정한다. 즉, echo 데이터의 저장 파일명, split beam 주파수, UL+UR과 DL+DR, 또한, UL+DL과 UR+DR 진동자 블록 사이의 음향중심간격, echo 데이터의 수록시간(acquisition time), 데이터 샘플링 간격(펄스반복 시간), 전치증폭기 이득, TVG 증폭기의 유형, 파일에 저장할

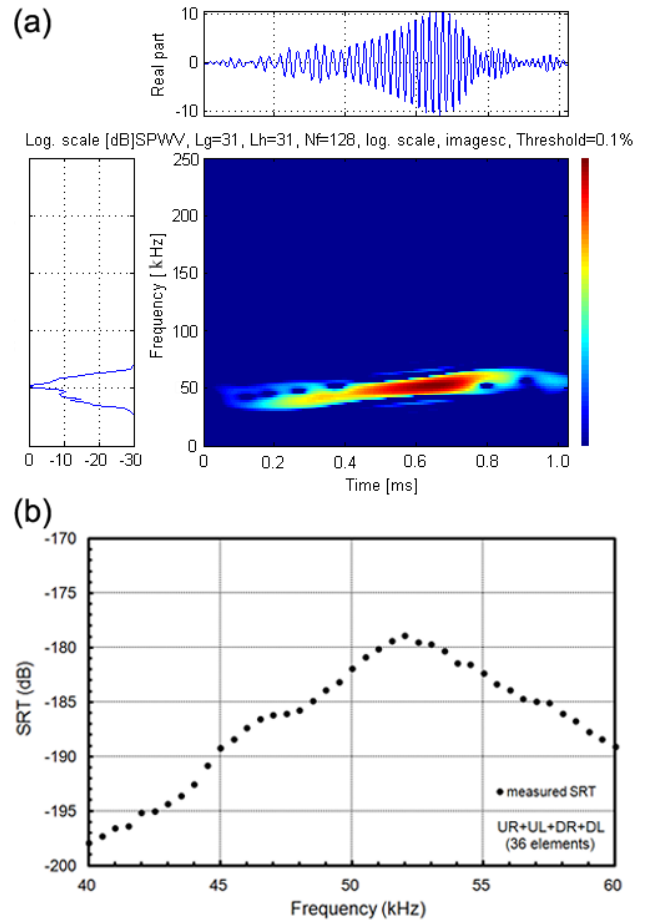


Fig. 8. Time-frequency response (a) and SRT (b) for the sum beam of UL, UR, DL and DR quadrants of a developed 50 kHz split beam transducer. The time-frequency response was used to quantify the receiving sensitivity of the split-beam transducer. The receiving sensitivity is to be obtained when all four quadrants are connected in parallel. UL, upper left; UR, upper right; DL, down left; DR, down right; SRT, receiving sensitivity.

echo ping 수 등을 설정한 후, stand by 스위치를 누르면 데이터 수록이 시작됨과 동시에 현재 파일에 저장된 ping 수가 자동적으로 표시된다. 반면, 데이터 해석 모드는 입력선택 스위치를 파일 시스템으로 전환하고, 분석을 희망하는 데이터 파일명을 입력한 후, 해당 파일에 저장된 ping 번호를 순차적으로 호출하면, Fig. 11에서와 같이 데이터 파일에 수록된 echo 신호와 빔 내의 분포하는 어류의 위치각 데이터가 자동적으로 표시된다. 이 때, Fig. 11의 split beam processor에서는 어떤 데이터 파일로부터 해당 ping 번호에 대한 특정 echo 신호의 음속에 대한 선수미 방향(UL+UR과 DL+DR)과 정횡 방향(UL+DL과 UR+DR)에 대한 어류의 위치각을 사용자가 직접 추적할 수 있도록 하였다. 즉, ping select 우측에 위치하는 echo 신호의 시간 인덱스(time index) 스위치를 조작하여 어류 echo 파형의 위치로 추적

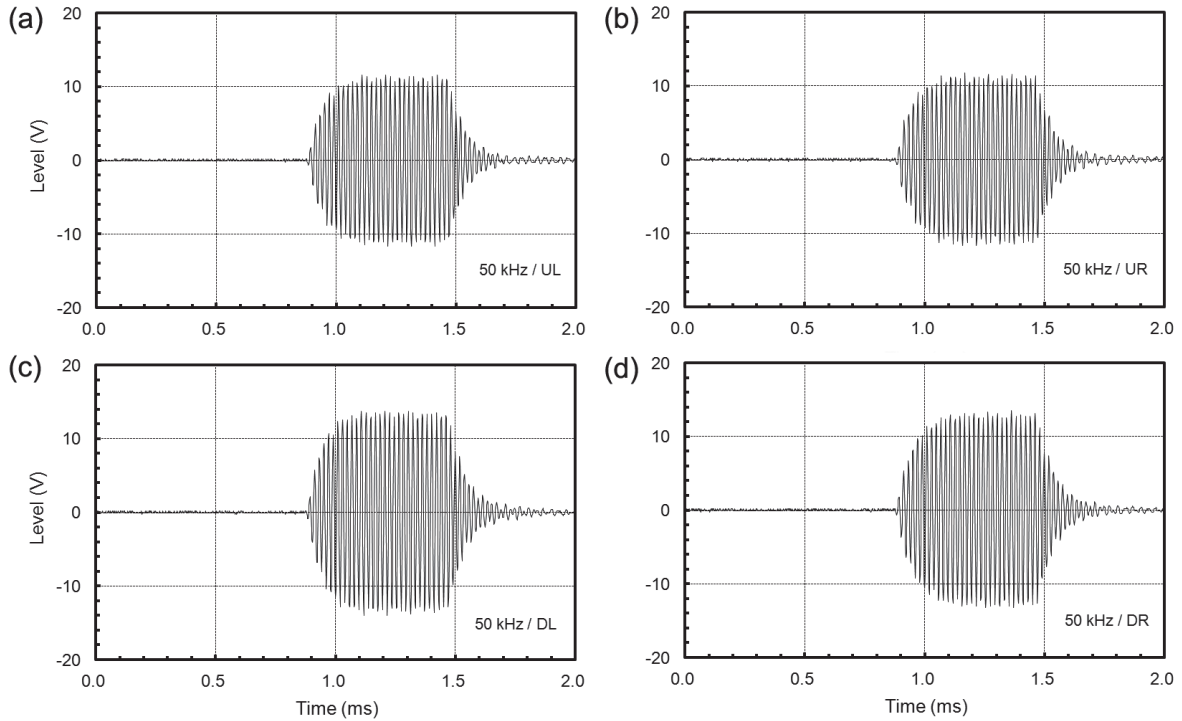


Fig. 9. Receiving pulse responses for UL, UR, DL and DR quadrants of a developed 50 kHz split-beam transducer. UL, upper left; UR, upper right; DL, down left; DR, down right.

cursor (적색 circle)를 이동시키면, 선수미 방향 및 정횡 방향에 대한 echo 신호의 전기적 위상각으로부터 산출된 개체의 위치각이 자동적으로 표시된다. 이와 동시에 이들 어류의 빔 내의 위치좌표는 소프트웨어 layout의 우측 하단에 위치한 탐지 좌표 상에서 직접 확인할 수 있도록 하였다. 이와 같이 측정된 어류의 빔 내의 위치좌표에 대한 신뢰도 평가는 수조실험을 통해 검증하였다. 이를 위해 대형음향수조의 수면상에 설치한 split beam 음향변환기로부터 깊이 약 2.3 m (약 3.0 ms) 위치에 텅스텐 교정구(WC; 직경 40 mm)를 현수시킨 후, split beam processor 에서 수록한 echo 응답특성으로부터 빔 내의 위치좌표를 추정 한 결과와 실제의 위치좌표를 비교, 분석하였다. Fig. 11에서 UL, UR, DL 및 DR의 echo 응답은 각각 Fig. 2와 Fig. 3에 나타 낸 split beam 음향변환기의 UL, UR, DL 및 DR의 진동자 블록 에서 출력되는 시간응답특성이다. 또한, left, right, up 및 down 의 echo 응답은 각각 UL+DL, UR+DR, UL+UR 및 DL+DR 의 좌우 정횡 방향과 선수미 방향의 진동자 블록에 대한 합성시 간응답특성을 나타낸 것이다. Fig. 11에서 약 3.0 ms 위치에 출 현하는 텅스텐 교정구의 좌우 정횡 방향과 선수미 방향에 대한 방향각 θ_1 및 θ_2 의 추정치는 각각 $\theta_1=+0.45^\circ$, $\theta_2=-6.36^\circ$ 이었다. 여기서, θ_1 값의 +부호는 echo 신호가 정횡 방향의 UL+DL 진 동자 블록에 먼저 도래하였다는 것을 의미하고, θ_2 값의 - 부호 는 선수미 방향의 DL+DR 진동자 블록에 echo 신호가 먼저 도

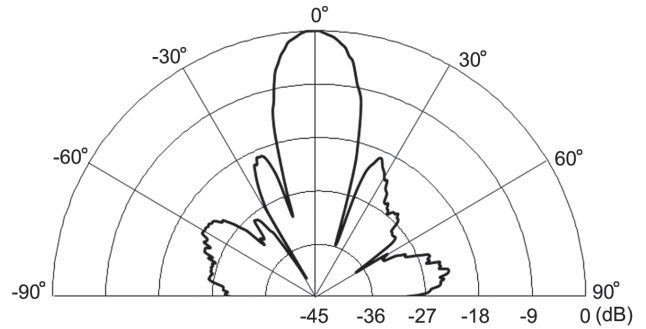


Fig. 10. Measured transmission beam patterns for a developed 50 kHz split-beam transducer.

래하였다는 것을 의미한다. 이들 θ_1 과 θ_2 의 두 방향각을 이용하여 산출한 음측에 대한 echo 신호의 도래각(direction of arrival, DOA) θ_c , 즉, 교정구의 합성 방향각을 구하면, $\theta_c=\sqrt{\theta_1^2+\theta_2^2}=6.38^\circ$ 로서, 이들 추정치는 실제 교정구를 빔 내에 현수시킨 위 치에 대한 방향각과 잘 일치하였다.

Fig. 11의 split beam 데이터 수록 및 처리 시스템의 가장 특징 적인 기능은 선박에 탑재되어 있는 기존의 single beam 어군탐 지기를 사용하여 고가의 split beam 어군탐지기가 갖는 어류의 체장추정 기능을 구현하였다는 점이다. 즉, 기존의 single beam

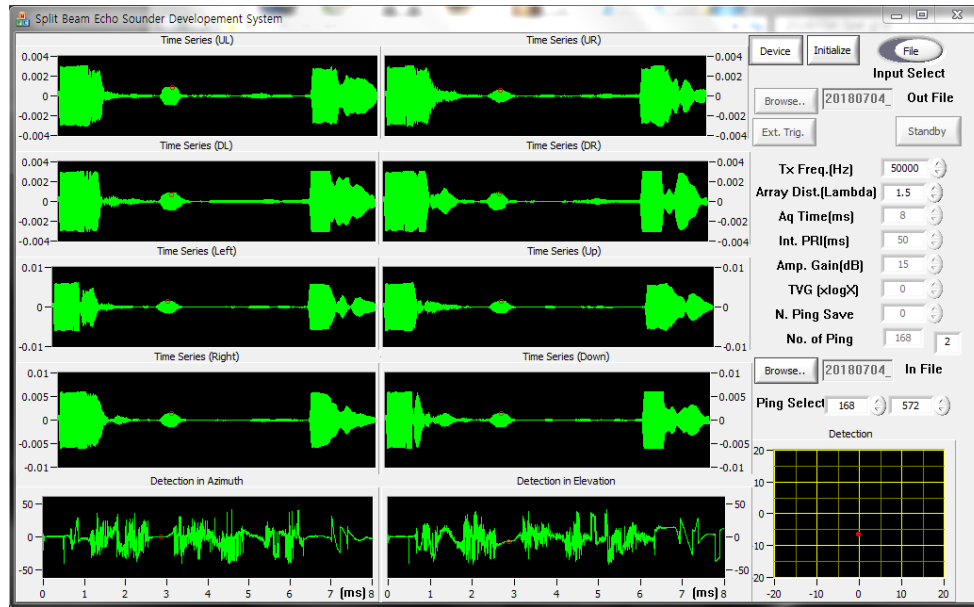


Fig. 11. Layout for the software module of the split-beam data acquisition and processing system developed in this study. The location of a 40 mm WC (tungsten carbide sphere with 6% cobalt binder) sphere suspended at about 2.3 meters depth just below the split-beam transducer was obtained by estimating the phase differences between adjacent transducer quadrants. In the split-beam processor, the distance between the acoustic centers of adjacent quadrants was given as a function of the acoustic wavenumber and the estimated location was displayed as a function of the direction angle relative to the beam axis of the transducer. UL, upper left; UR, upper right; DL, down left; DR, down right.

어군탐지기로부터 전기적인 송신펄스신호와 trigger 신호를 공급받아 본 연구에서 설계, 개발한 split beam processor와 split beam 음향변환기를 구동하면, 어류의 반사강도 추정하는 데 필요한 빔 내의 소재위치에 대한 방향각을 추정할 수 있으므로, 이들 방향각에 대한 지향성 보정을 수행하면 어류의 반사강도를 구할 수 있다.

Fig. 11에서 알 수 있는 바와 같이 본 연구의 궁극적인 목적은 우리나라 연근해 어선에 탑재되어 있는 50 kHz의 single beam 어군탐지기를 사용하여 적은 비용으로 선택적 어업을 실현하는데 필요한 어류의 체장정보를 보다 손쉽게 얻기 위한 기법을 개발하는 것이었다. 이 때문에 본 연구에서는 음향 빔 내에 존재하는 어류의 소재위치를 추정하고, 이들 위치로부터 도래하는 echo 신호의 합성 위치각을 추정하는데 연구의 초점을 두었다.

본 연구에서 설계한 split beam 데이터 수록 및 처리 시스템은 이를 위한 목적에 국한하여 실험적으로 개발되었기 때문에 echogram 모니터링, 어류 체장의 표시 window, 항법시스템정보의 표시기능 등 추가적으로 보완 및 개선해야 할 점이 많아 향후 지속적으로 개량, 발전시킬 예정이다.

사 사

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2021년)에 의하여 연구되었음.

References

- Airmar Technology Corporation. 2013. Technical data catalog. Milford, NH, U.S.A., 274-325.
- Burdic W. 1991. Underwater acoustic system analysis. Prentice Hall, Hoboken, NJ, U.S.A., 327-332.
- Digilent. 2011. Digilent nexys2 board reference manual. Digilent Inc., Pullman, WA, U.S.A., 1-17.
- Fuji Ceramics Corporation. 2018. Guide for using a piezoelectric elements. Fujinomiya-shi, Japan, 1-28.
- 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 Oceanogr 16, 1997-2012. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1986\)016<1997:AOTWDT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1986)016<1997:AOTWDT>2.0.CO;2).
- 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. 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. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2011.0423>.
- 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. 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, 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. 2018. Performance characteristics of chirp data acquisition and processing system for the 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>.
- Levanon N. 1988. Radar principles. John Wiley and Sons, New York, NY, U.S.A., 285-297.
- Mahafza BR. 1998. Introduction to radar analysis. CRC Press, Boca Raton, FL, U.S.A., 251-254.
- 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/iet-rsn:20060123>.