

대역통과 정합회로를 이용한 수중음향변환기의 대역폭 확장

이대재*

부경대학교 해양생산시스템관리학부

Bandwidth Enhancement of Underwater Acoustic Transducer Using a Bandpass Matching Network

Dae-Jae Lee*

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

The range resolution of echo sounders can be improved by enhancing the transducer bandwidth. We designed a bandpass matching network for expanding the bandwidth of a transducer by scaling in both impedance and frequency after transforming a lowpass network into a bandpass configuration for a third-order Bessel filter. We measured the effect of the Bessel matching network for a 50 kHz sandwich type transducer on the transmitting voltage response (TVR), receiving sensitivity (SRT) and figure of merit (FOM), using a chirp echo sounder system. Both the simulation and experimental results indicated that the transducer with a bandpass matching network was capable of producing a symmetrical acoustic output over a wider bandwidth (8.25 kHz) than was the transducer without a matching network (3.75 kHz). By implementing the Bessel matching network, we achieved a 120% bandwidth enhancement.

Key words: Bandwidth enhancement, TVR, Acoustic transducer, Bandpass matching network, Transfer function

서론

중래의 어군탐지기에서는 주파수 대역폭이 매우 좁은 음향펄스신호를 수중으로 방사하고, 어족생물로부터 산란되는 어군 echo 신호를 수신, 분석하여 대상 어류의 생물학적 및 음향학적 정보 등을 탐지하여 왔다(Airmar Technology Corporation, 1994). 이와 같은 어군탐지기에서 최대의 탐지성능을 얻기 위해서는 작동 주파수와 송·수파기의 공진 주파수가 반드시 일치해야 한다. 그러나, 조업해역에 따라 수온이 변화하여 송·수파기의 공진특성이 변동하면 어군탐지기의 탐지성능, 즉 송·수신 감도가 급격히 저하하는 문제가 발생한다. 또한, 일반적으로 기존의 어군탐지기에서는 기계적 품질계수(quality factor)가 매우 큰 송·수파기를 사용한다. 이 때문에 비록 송·수파기에 전기적인 구형펄스신호(rectangular pulse signal)를 공급하더라도 해중으로 방사되는 음향펄스신호는 가우시안 파형(Gaussian waveform)으로 변화(distortion)되기 때문에 어족생물의 식별 분해능이 급격히 저하한다. 따라서, 어군탐지기에 대한 어족생물의 식별 분해능을 향상시키기 위해서는 송·수파기의 주파수 대역폭을 확장시킬 필요가 있다. 이렇게 하면 해중으로 방사되

는 음향펄스신호의 파형은 송·수파기에 공급되는 전기적인 구형펄스신호의 파형과 거의 유사한 형상이 된다(Lee, 2014; Lee et al., 2014). 이를 통해 현용의 어군탐지기에서 사용하고 있는 송·수파기의 주파수 대역폭이 확장되면, 해저 부근에 분포하는 어족생물이나 군집하고 있는 개체의 식별 분해능이 향상되고, 또한, 수심의 측량 정밀도 등이 향상된다(Lee, 2014; Lee, 2015; Lee et al., 2016, Lee, 2017). 본 연구에서는 이 점에 주목하여 현재 우리나라 어선에서 가장 많이 사용하고 있는 50 kHz의 샌드위치형 음향변환기(sandwich type acoustic transducer)를 대상으로 주파수 대역폭을 확장시키기 위한 대역통과 정합회로를 설계하였다. 또한, 이 정합회로를 갖는 음향변환기와 갖지 않는 음향변환기에 대한 송·수신 성능특성을 실험적으로 비교, 분석하였다.

재료 및 방법

음향변환기의 대역통과 정합회로 설계

본 연구에서 실험에 사용한 음향변환기는 Fig. 1의 (a)에 나타

*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.2019.0702>

Korean J Fish Aquat Sci 52(6), 702-708, December 2019

Received 11 October 2019; Revised 18 November 2019; Accepted 19 November 2019

저자 직위: 이대재(교수)

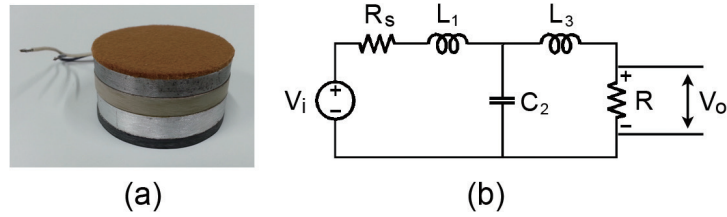


Fig. 1. (a) Photograph of sandwich type acoustic transducer used in this study, (b) Third-order lowpass equivalent circuit of the matched transducer.

낸 샌드위치형 초음파 진동자이다. 이 음향변환기는 티탄산 바륨(barium titanate, BaTiO₃) 소자의 전면과 후면에 각각 알루미늄 재질의 head mass와 철 재질의 tail mass를 체결하여 제작한 직경 51 mm의 진동자이다(Murata, 1978; Airmar, 1994; Tokin, 1999). Fig. 1의 (a)에 나타난 초음파 진동체는 수중에서의 송·수신 성능특성을 측정하기 위해 실험 전에 수밀 처리를 하였다. 음향 윈도우(acoustic window, 두께 약 5 mm)는 비교적 연질의 우레탄(urethane rubber, Setchcast 2130, 3M, Austin, TX, USA)으로 성형하였고, 그 이외의 하우징(housing)은 경도가 더 높은 다른 종류의 우레탄 고무(Flexane 80 Liquid 15800, Devcon, Danvers, MA, USA)로 몰딩하였다. 이 때, 음향 윈도우로부터 발생하는 후면방사의 영향을 저감시키기 위해 tail mass 표면에 두께 3 mm의 콜크 층(cork layer)를 부착하였다. Fig. 1의 (a)에 나타난 음향변환기의 BVD (Butterworth-van dyke) 등가회로를 포함하는 3차 저역통과 정합회로는 Fig. 1의 (b)와 같다(Coates and Mathams, 1988; Radmanovic and Mancic, 2004).

본 연구에서는 Fig. 1의 (b)에 나타난 Bessel 저역통과 필터함수를 이용하여 대역통과 정합회로를 설계하였다. Fig. 1에 나타난 Bessel 저역통과 ladder network에 대한 각 전기소자의 값은 송신부의 출력 임피던스 R_s 가 음향변환기의 방사 임피던스 R 과 같다고 가정하여 구하였다. 즉, $R_s \approx R=1$ 이라고 가정하였을 때, $L_1=0.3374$, $C_2=0.9705$, $L_3=0.2034$ 이었다(Bowick, 1982; Winder, 2002). 한편, Fig. 1에 나타난 음향변환기의 3차 저역통과 정합회로를 6차 대역통과 정합회로로 변형시켜 나타내면 Fig. 2와 같다(Coates and Mathams, 1988; Coates, 1991;

Stansfield, 1991; Radmanovic and Mancic, 2004). 이 때, Fig. 2의 ladder network에 대한 전기소자 값들은 Fig. 1의 각 branch에 대한 전기소자 값을 대역통과 회로망으로의 주파수 변환과 임피던스 스케일링(Scaling)을 통해 구하였다(Bowick, 1982; Hong and Lancaster, 2001). 즉, Fig. 2에 나타난 각 ladder 회로의 인덕턴스(inductance) L 과 커패시턴스(capacitance) C 값은 다음 식에 의해 구하였다(Hong and Lancaster, 2001; Radmanovic and Mancic, 2004).

$$R_L = R \cdot \beta$$

$$L_{1b} = \frac{L_1}{\Delta f} \cdot \beta$$

$$C_{1b} = \frac{\Delta f}{\omega_s^2 \cdot L_1 \cdot \beta}$$

$$L_{2b} = \frac{\Delta f}{C_2 \cdot \omega_s^2} \cdot \beta$$

$$C_{2b} = \frac{C_2}{\Delta f \cdot \beta} - C_o$$

$$L_{3b} = \frac{L_3}{\Delta f} \cdot \beta$$

$$C_{3b} = \frac{\Delta f}{\omega_s^2 \cdot L_3 \cdot \beta}$$

여기서, β 는 임피던스 스케일링 상수, Δf 는 정합회로의 대역폭이다. 또한, C_o 는 음향변환기의 제동용량(clamped capacitance), f_s 는 음향변환기의 직렬 공진주파수($\omega_s=2\pi f_s$)이다(Coates and Maguire, 1989).

Fig. 1의 (a)에 나타난 음향변환기의 BVD 등가회로에 대한 각 전기소자의 측정치는 $C_o=0.0048 \mu F$, $L_{3b}=18.3 mH$, $C_{3b}=0.545 nF$, $R_L=228 \Omega$ 이었다. 또한, Fig. 1의 (b)에 나타난 3차 저역통과 정합회로를 Fig. 2의 6차 대역통과 정합회로로 변형시켜 나타낸 각 전기소자의 이론 계산치는 각각 $L_{1b}=2.799 mH$, $C_{1b}=3.558 nF$, $L_{2b}=64.32 \mu H$, $C_{2b}=0.15 \mu F$ 이었다. 그러나, 본 연구에서는 반복적인 실험을 통해 각각 $L_{1b}=2.6 mH$, $C_{1b}=3.6 nF$, $L_{2b}=65 \mu H$, $C_{2b}=0.15 \mu F$ 의 값을 갖는 실험적인 대역통과 정합회로를 설계하여 송·수신 성능특성을 측정하였다.

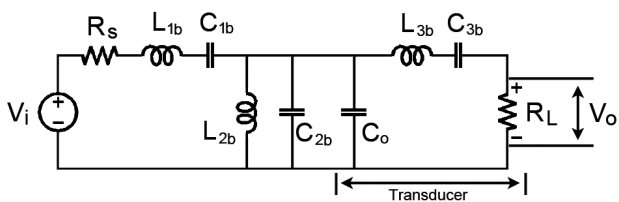


Fig. 2. Sixth-order bandpass matching network with ladder filter representation of acoustic transducer.

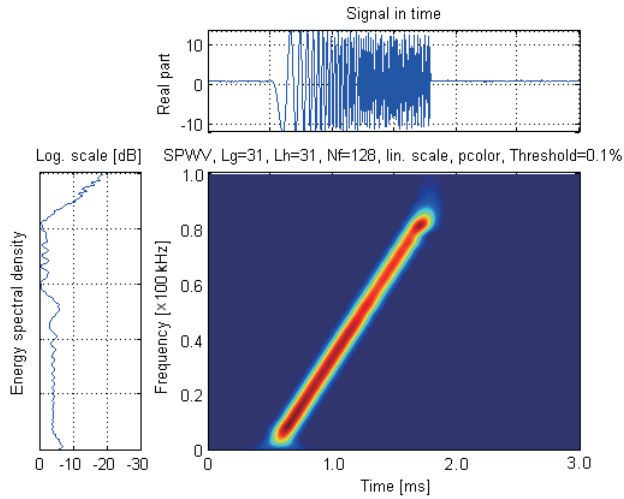


Fig. 3. Time-frequency response characteristic of chirp pulse signal at the electrical terminal of sandwich type acoustic transducer.

한편, Fig. 2의 ladder 필터소자로 나타낸 대역통과 정합회로를 포함하는 음향변환기의 송파모드에 대한 전달함수(transfer function)는 입력신호를 V_i , 출력신호를 V_o 라 할 때, 다음 식에 의해 구할 수 있다(Coates and Mathams, 1988; Coates, 1991).

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{KS^3}{As^6 + Bs^5 + Cs^4 + Ds^3 + Es^2 + Fs + G} \dots\dots\dots (1)$$

$$A=1$$

$$B=R_s/L_{1b} + R_L/L_{3b}$$

$$C_{bb}=C_{2b} + C_o$$

$$C_1=(L_{1b} + L_{2b})/L_{2b} + C_{bb}/C_{1b}$$

$$C_2=C_1/(L_{1b} * C_{bb})$$

$$C=C_2 + (R_L * R_s)/(L_{3b} * L_{1b}) + 1/(C_{3b} * L_{3b})$$

$$K=R_L/(L_{1b} * L_{3b} * C_{bb})$$

$$D=R_s/(L_{1b} * L_{2b} * C_{bb}) + K * C_1 + R_s/(L_{1b} * L_{3b} * C_{3b})$$

$$E_1=1/(L_{1b} * L_{2b} * C_{1b} * C_{bb})$$

$$E_2=(R_L * R_s)/(L_{1b} * L_{2b} * L_{3b} * C_{bb})$$

$$E_3=C_1/(L_{1b} * L_{3b} * C_{3b} * C_{bb})$$

$$E=E_1 + E_2 + E_3$$

$$F=R_L/(L_{1b} * L_{2b} * L_{3b} * C_{1b} * C_{bb}) + R_s/(L_{1b} * L_{2b} * L_{3b} * C_{3b} * C_{bb})$$

$$G=1/(L_{1b} * L_{2b} * L_{3b} * C_{1b} * C_{3b} * C_{bb})$$

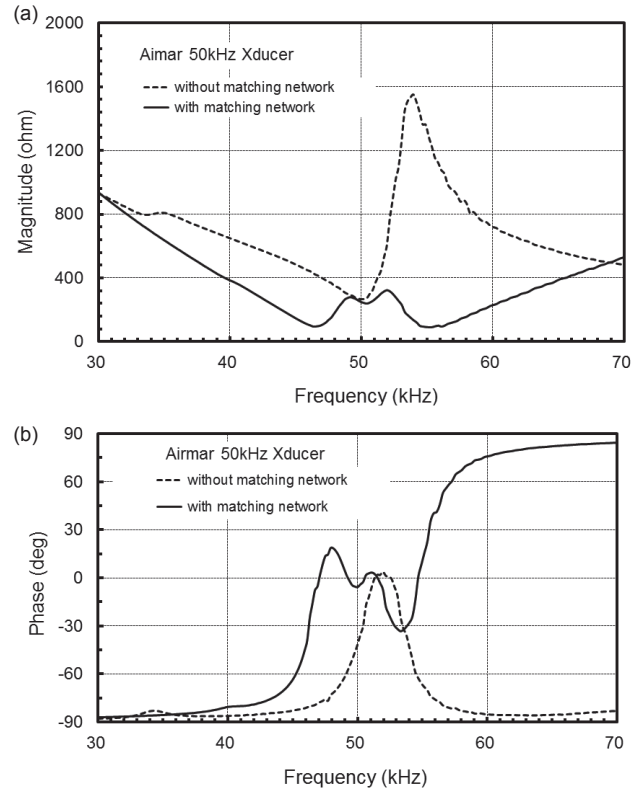


Fig. 4. Magnitude (a) and phase characteristics (b) of the input electric impedance for sandwich type acoustic transducer in water without (dot line) and with a bandpass matching network (solid line).

음향변환기의 주파수 응답특성의 측정

본 연구에서 제작한 샌드위치형 음향변환기에 대한 수중에서의 전기적인 임피던스는 정밀 LCR meter (7600, QuadTech, USA)를 사용하여 측정하였다. 또한, 음향변환기의 송파응답 특성(transmitting voltage response, TVR)과 수파응답특성(receiving sensitivity, SRT)은 대형실험수조(L×B×D, 5×6×5 m)에서 측정하였다(Lee, 2017).

실험에서는 Fig. 3의 chirp 신호(펄스폭 1.25 ms)를 미리 생성하여 임의파형발생기(33120A, HP, Spring, TX, USA)의 메모리에 저장시켜 놓은 후, 필요에 따라 이것을 호출하여 사용하였다(Dong and Cui, 2012). 송·수신 응답특성의 측정에서는 임의파형발생기로부터 발생시킨 Fig. 3의 전압 400 mV, 주파수 대역 1-80 kHz의 chirp 신호를 전력 증폭기(2713, B&K, Denmark)에서 증폭한 후, 이 신호를 대역통과 정합회로(bandpass matching network)를 경유하여 음향변환기에 공급하였다. 음향변환기에서 방사되는 송신펄스신호는 수중청음기(model 8100, B&K, Denmark)를 사용하여 수신한 후, Measuring amplifier (model 2610, B&K, Denmark)에서 증폭하고, 이 증폭된

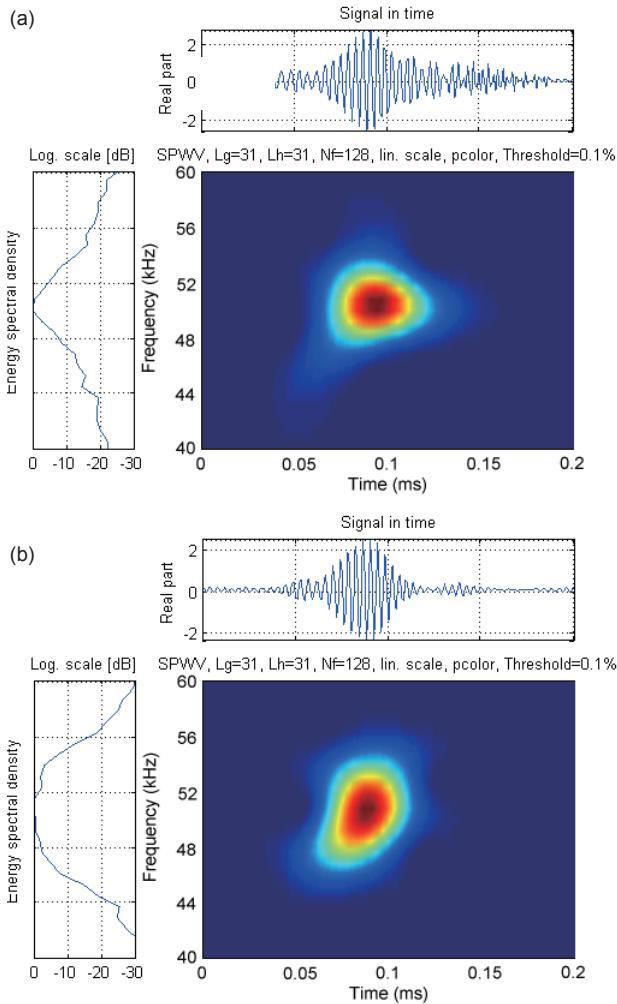


Fig. 5. Time-frequency response characteristics of the transmitted chirp pulse signal for sandwich type acoustic transducer without (a) and with a bandpass matching network (b).

신호를 디지털 오실로스코프(DS1530, EZ, Korea) 및 FFT 분석기(3525, AND, Japan)에 수록하였다. 이와 같이 수록한 출력 신호를 이용하여 음향변환기의 송파 및 수파응답특성을 구하였다. 한편, 본 연구에서는 Fig. 1에 나타낸 음향변환기를 2 set 제작하여 하나는 송파용으로, 다른 하나는 수파용으로 사용하여 수파감도특성을 구하였다.

결과 및 고찰

샌드위치형 음향변환기의 임피던스 특성

본 연구에서 제작한 Fig. 1의 (a)에 나타낸 샌드위치형 수중 음향변환기에 대한 입력 전기 임피던스의 주파수 응답특성을 나타낸 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 (a)는 임피던스의 진폭특성이고, (b)는 임피던스의 위상특성이다. 또한, Fig. 4에서 점선

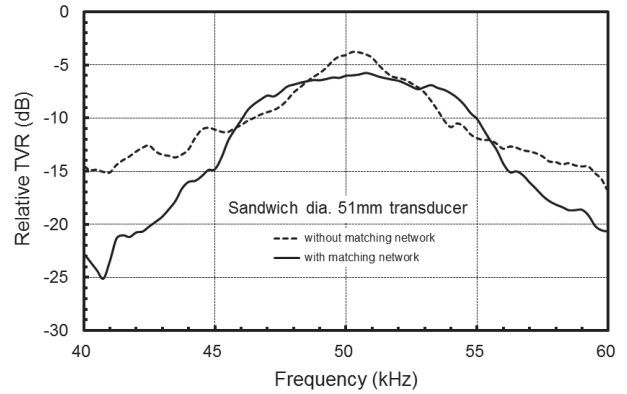


Fig. 6. Frequency response characteristics of the relative transmitting voltage response (TVR) for sandwich type acoustic transducer without (dot line) and with a bandpass matching network (solid line).

은 정합회로가 없는 음향변환기에 대한 임피던스의 주파수 응답특성이고, 실선은 Fig. 2의 Bessel 대역통과 정합회로를 내장하고 있는 음향변환기에 대한 임피던스의 주파수 응답특성이다. 먼저, 정합회로가 없는 수중 음향변환기의 경우, 그 공진(직렬공진) 및 반공진(병렬공진) 주파수는 각각 50.01 kHz와 53.76 kHz에 출현하였고, 이들 공진 주파수에 대한 임피던스 진폭은 각각 266.9 Ω과 1535.9 Ω이었다. 또한, 정합회로가 없는 경우에는 33.65 kHz에서도 진동성분이 출현하였고, 그 임피던스 진폭은 797.05 Ω이었다. 본 연구에서는 33.65 kHz 부근에 나타나는 임피던스의 주파수 응답은 고려하지 않았다. 즉, Fig. 4의 50.01 kHz 부근에 출현하는 직렬공진 응답특성에 대한 주파수 대역을 확장시키기 위한 정합회로만을 설계, 제작하여 실험적으로 분석, 고찰하였는데, 그 결과는 Fig. 4의 실선과 같다. Fig. 4에서 Bessel 대역통과 정합회로가 접속된 수중 음향변환기에서는 46.51 kHz, 50.43 kHz 및 55.39 kHz에서 임피던스 진폭이 최소가 되는 공진응답특성이 출현하였는데, 이들 주파수에서의 임피던스 진폭은 각각 95.0 Ω, 239.2 Ω 및 91.1 Ω이었다. 한편, 임피던스 진폭이 최대가 되는 반공진 응답특성은 각각 49.4 kHz와 52.2 kHz에서 출현하였는데, 이들 주파수에서의 임피던스 진폭은 각각 274.8 Ω과 315.5 Ω이었다. Fig. 4에서 3개의 공진 주파수와 2개의 반공진 주파수에 대한 평균적인 임피던스의 차는 153.4 Ω이었다. 본 연구에서는 정합회로가 없는 경우에 대한 공진 주파수(50 kHz)를 중심으로 -3 dB 구간에서 ±4 kHz의 주파수 대역폭을 생성함으로써 약 6 정도의 기계적 품질계수(quality factor, Q)를 실현하고자 하였다.

샌드위치형 음향변환기의 송파감도 특성

Fig. 1의 샌드위치형 음향변환기에 Fig. 3의 전기적인 chirp 신호를 공급하여 수중으로 음향펄스신호를 송출한 후, 음축상 약 1.2 m 거리에 설치한 수중 청음기로부터 출력되는 펄스신호의

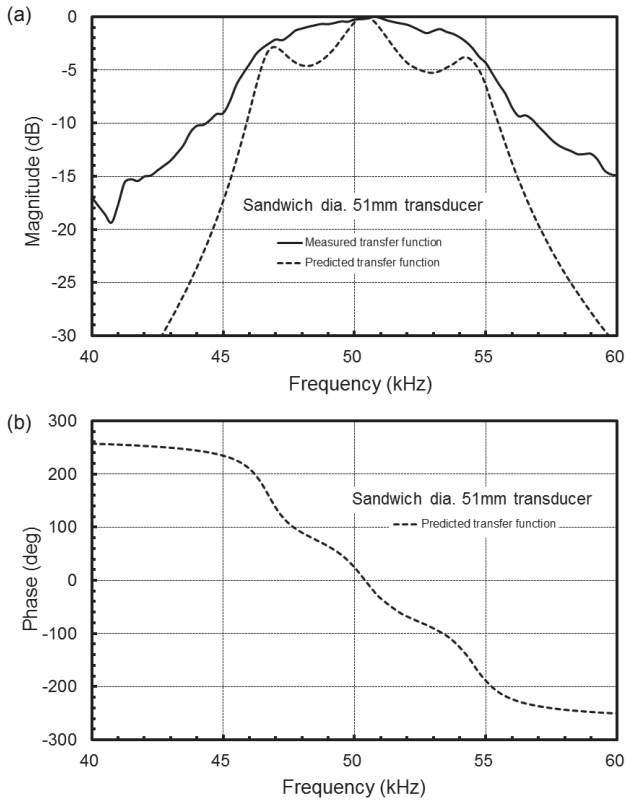


Fig. 7. Comparison of the measured (solid line) and calculated transfer functions (dot line) for sandwich type acoustic transducer with a bandpass matching network.

시간-주파수 송신응답특성을 구한 결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 (a)는 정합회로가 없는 음향변환기의 시간-주파수 송신응답특성이고, (b)는 Bessel 대역통과 정합회로를 내장한 음향변환기에 대한 시간-주파수 송신응답특성이다. Fig. 5의 (a)와 (b)에서 시간응답파형은 각각 위쪽에 나타내었고, 주파수 응답 스펙트럼은 각각 왼쪽에 나타내었다. 이들 주파수 응답 스펙트럼에서 진폭은 최대값을 0 dB로 정규화하여 0-30 dB 범위에 대하여 나타내었다. Fig. 5의 (a)에서 정합회로가 없는 음향변환기에 대한 음향펄스신호의 송신 주파수응답은 50.25 kHz에서 가장 강하게 출현하였다. 이 주파수를 기준으로 측정된 -3 dB에 대한 하한 및 상한 주파수는 각각 48.5 kHz, 52.25 kHz이었다. 한편, Fig. 5의 (b)에서 정합회로가 내장된 음향변환기의 음향펄스신호의 송신 주파수응답은 51.0 kHz에서 가장 강하게 출현하였고, -3 dB에 대한 하한 및 상한 주파수는 각각 46.25 kHz, 54.5 kHz이었다. Fig. 3에 나타난 수중 음향변환기의 전기적인 chirp 펄스신호의 주파수 스펙트럼과 Fig. 5에 나타난 음향펄스신호의 스펙트럼을 이용하여 대역통과 정합회로의 존재여부에 따른 송파감도특성을 비교, 분석한 결과는 Fig. 6과 같다.

Fig. 6에서 종축은 상대적인 송파감도(dB)이고, 횡축은 주파

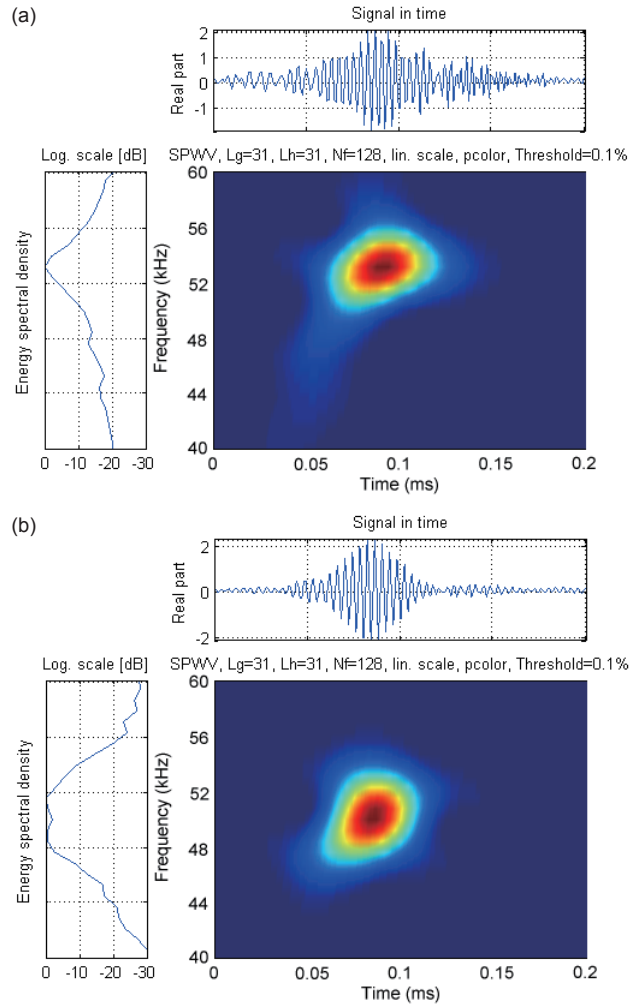


Fig. 8. Time-frequency response characteristics of the received chirp pulse signal for sandwich type acoustic transducer without (a) and with a bandpass matching network (b).

수(kHz)이다. 또한, 점선과 실선은 각각 정합회로가 없는 경우와 Bessel 대역통과 정합회로가 내장된 음향변환기에 대한 송파감도이다. Fig. 6에서 정합회로가 없는 음향변환기에서는 송파감도의 peak 레벨은 50.5 kHz에서 출현하였다. 이 주파수를 기준으로 측정된 -3 dB에 대한 하한 및 상한 주파수는 각각 48.5 kHz, 52.25 kHz로서, 그 대역폭 및 기계적 품질계수는 각각 3.75 kHz와 13.47이었다. 한편, 정합회로를 갖는 음향변환기의 경우에 있어서는 송파감도의 peak 레벨은 50.75kHz에서 출현하였다. 이 주파수를 기준으로 측정된 -3 dB에 대한 하한 및 상한 주파수는 각각 46.25 kHz, 54.5 kHz로서, 그 대역폭 및 기계적 품질계수는 각각 8.25 kHz와 6.06이었다. 이들의 결과는 Fig. 5에 나타난 음향펄스신호의 시간-주파수 송신응답특성과 일치하였다. 즉, 대역통과 정합회로가 있는 경우와 없는 경우

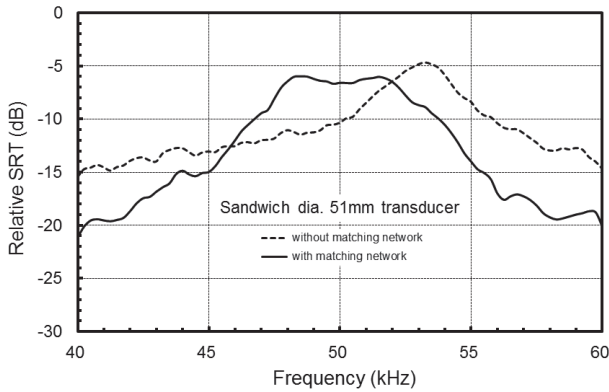


Fig. 9. Frequency response characteristics of the relative receiving sensitivity (SRT) for sandwich type acoustic transducer without (dot line) and with a bandpass matching network (solid line).

에 대한 주파수 대역폭에는 큰 차이가 있었다. 즉, Bessel 대역통과 정합회로를 갖는 샌드위치형 음향변환기의 주파수 대역폭은 정합회로를 갖지 않는 경우에 비해 송파감도의 대역폭이 약 120% 정도 확장되었다.

측정 및 수치 시뮬레이션에 의한 송파감도의 비교

Fig. 2에 나타난 대역통과 정합회로를 내장하고 있는 샌드위치형 음향변환기의 송신모드에 대한 전달함수의 측정 및 수치 계산 패턴을 비교, 분석한 결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서 실선은 전달함수의 측정패턴이고, 점선은 (1)식에 의한 수치 시뮬레이션 패턴이다. 또한, Fig. 7의 (a)와 (b)는 각각 전달함수의 진폭 및 위상특성이다. Fig. 7의 측정패턴은 Fig. 6의 송파감도의 패턴과 일치하는 패턴으로서 ripple이 거의 없는 완만한 음향방사 패턴을 나타내었다. 그러나, 수치 시뮬레이션에 의한 주파수 응답패턴에서는 측정패턴과 달리 3개의 peak 모드가 출현하였다. 즉, 가장 강한 peak 응답은 50.75 kHz에서 출현하였고, 이 주파수를 기준으로 46.95 kHz에서 -2.86 dB의 제2의 peak 응답과 54.26 kHz에서 -3.83 dB의 제3의 peak 응답이 출현하였다. 이와 같은 수치 시뮬레이션 패턴은 Fig. 4의 (a)에 나타난 입력 전기 임피던스 패턴에서 진폭이 최소가 되는 3개의 공진 주파수와 매우 밀접한 관계를 갖고 있다. 즉, Fig. 7에서 3개의 peak 응답은 Fig. 4의 (a)에 대한 공진 주파수가 출현하는 46.51 kHz, 50.43 kHz 및 55.39 kHz 부근에서 출현하였다. 그러나, 송파모드에 대한 전달함수의 전반적인 응답특성을 살펴보면, 수치계산에서는 비록 3개의 peak 응답패턴이 출현하였지만, 수중으로 음향에너지가 방사되는 송신특성에서는 거의 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

샌드위치형 음향변환기의 수파감도 특성

실험수조에 2 set의 샌드위치형 음향변환기를 1.2 m 분리시

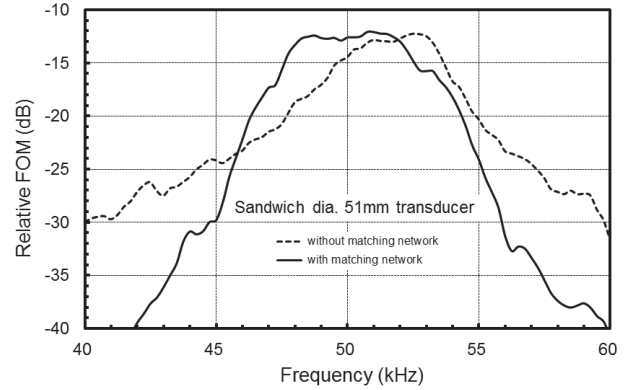


Fig. 10. Frequency response characteristics of the relative figure of merit (FOM) for sandwich type acoustic transducer without (dot line) and with a bandpass matching network (solid line).

켜 서로 마주보도록 설치한 후, 한 쪽에서는 Fig. 3의 전기적인 chirp 신호를 수중으로 송출하고, 다른 쪽에서는 음향펄스신호를 수신하여 그 시간-주파수 수신응답특성을 구한 결과는 Fig. 8과 같다.

Fig. 8에서 송신용에는 대역통과 정합회로가 내장되어 있었지만, 수신용에는 대역통과 정합회로를 스위치를 통해 ON/OFF 할 수 있도록 하였다. Fig. 8에서 (a)는 정합회로를 bypass시킨 음향변환기의 시간-주파수 수신응답특성이고, (b)는 Bessel 대역통과 정합회로를 거쳐 수신한 음향변환기의 시간-주파수 수신응답특성이다. Fig. 8에서 시간응답파형과 주파수 응답 스펙트럼은 Fig. 5와 유사한 경향을 나타내었다. 또한, 이들 수신 주파수 응답 스펙트럼에서 진폭은 최대값을 0 dB로 정규화하여 0-30 dB 범위에 대하여 나타내었다. Fig. 8의 (a)에서 정합회로를 bypass시킨 음향변환기에 대한 수신 peak 레벨은 53.25 kHz에서 출현하였다. 한편, Fig. 5의 (b)에서 정합회로를 거쳐 수신한 음향변환기의 수신 peak 레벨은 50 kHz를 전후하여 각각 48.5 kHz와 51.5 kHz에서 서로 대칭적으로 출현하였다.

한편, Fig. 5의 (b)에 나타난 수중 청음기에 의해 수신한 음향펄스신호의 주파수 스펙트럼과 Fig. 8의 음향펄스신호의 스펙트럼을 이용하여 대역통과 정합회로의 존재 여부에 따른 수파감도 특성을 비교, 분석한 결과는 Fig. 9와 같다. Fig. 9에서 종축은 상대적인 수파감도(dB)이고, 횡축은 주파수(kHz)이다. 또한, 점선과 실선은 각각 정합회로를 bypass시킨 경우와 Bessel 대역통과 정합회로를 접속한 음향변환기에 대한 수파감도이다. Fig. 8에서 정합회로를 bypass시킨 경우, 수파감도의 peak 레벨이 출현하는 53.25 kHz를 기준으로 측정된 -3 dB의 하한 및 상한 주파수는 각각 51.25 kHz, 54.5 kHz로서, 그 주파수 대역폭 및 기계적 품질계수는 각각 3.25 kHz, 16.38이었다. 한편, 정합회로를 접속한 음향변환기의 수파감도는 50 kHz를 기준으로 서로 대칭적인 패턴을 나타내었다. 따라서, 50 kHz를 기준으

로 -3 dB의 하한 및 상한 주파수를 측정하면, 그 값은 각각 47.0 kHz, 53.75 kHz이었고, 그 주파수 대역폭 및 기계적 품질계수는 각각 6.75 kHz, 7.41이었다. 이로부터 정합회로의 존재여부에 따라 수파감도의 주파수 대역폭에도 큰 차이가 있음을 알 수 있었다. 즉, Bessel 대역통과 정합회로를 갖는 샌드위치형 음향 변환기의 수신 대역폭은 정합회로를 갖지 않는 경우에 비해 수파감도의 대역폭이 100.8% 정도 확장되었다.

샌드위치형 음향변환기의 FOM 성능특성의 비교

본 연구에서 제작한 Fi. 1의 (a)에 나타난 음향변환기에 Fig. 2의 Bessel 대역통과 정합회로를 접속시킨 경우에 대한 FOM (figure of merit) 성능특성을 구한 결과는 Fig. 10과 같다. Fig. 10에서 종축은 상대적인 FOM 레벨(dB)이고, 횡축은 주파수(kHz)이다. 또한, 점선과 실선은 각각 정합회로가 없는 경우와 Bessel 대역통과 정합회로가 내장된 음향변환기에 대한 FOM 성능패턴이다. Fig. 10에서 정합회로가 없는 음향변환기에서는 FOM의 peak 레벨이 52.75 kHz에서 출현하였다. 이 주파수를 기준으로 측정한 -3 dB에 대한 하한 및 상한 주파수는 각각 49.5 kHz, 53.75 kHz로서, 그 대역폭 및 기계적 품질계수는 각각 4.25 kHz와 12.41이었다. 한편, 정합회로를 갖는 음향변환기의 FOM 성능특성은 50 kHz를 기준으로 서로 대칭적인 패턴을 나타내었다. 따라서, 50 kHz를 기준으로 -3 dB의 하한 및 상한 주파수를 측정하였는데, 이들 주파수는 각각 46.25 kHz, 54.5 kHz이었다. 즉, FOM의 주파수 대역폭 및 기계적 품질계수는 각각 5.75 kHz, 8.70이었다. 이들의 결과로부터 정합회로의 존재 여부에 따라 FOM 성능특성의 주파수 대역폭에 큰 차이가 있음을 알 수 있었다. 즉, Bessel 대역통과 정합회로를 갖는 샌드위치형 음향변환기의 FOM 성능특성에 대한 주파수 대역폭은 정합회로를 갖지 않는 경우에 비해 약 35% 정도 확장되었다.

이들의 결과로부터 우리나라 어선에서 가장 많이 사용하고 있는 50 kHz용 어군탐지기의 샌드위치형 음향변환기에 본 연구에서 제시한 Bessel 대역통과 정합회로를 내장시키면 주파수 대역폭이 증대되어 어족생물의 식별 분해능을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2019년)에 의하여 연구되었음.

References

- Airmar Technology Corporation. 1994. Airmar product catalog. NH, U.S.A., 14-15.
- Bowick C. 1982. RF circuit design. Elsevier Inc., Englewood Cliffs, NJ, U.S.A., 59-64.
- Coates R. 1991. The design of transducers and arrays for underwater data transmission. IEEE J Ocean Eng 16, 123-135.
- Coates R and Maguire PT. 1989. Multiple-mode acoustic transducer calculations. IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Contr 36, 471-473.
- Coates R and Mathams RF. 1988. Design of matching networks for acoustic transducers. Ultrasonics 26, 59-64.
- 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.
- Hong JS and Lancaster MJ. 2001. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, U.S.A., 48-56.
- Lee DJ. 2014. Bandwidth enhancement of a broadband ultrasonic mosaic transducer using 48 tonpizl 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. 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. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2015.0221>.
- 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>.
- 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, 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>.
- Murata MFG. 1978. Ceramic ultrasonic transducer catalog (P311/78). Kyoto, Japan, 1-4.
- Radmanovic M and Mancic D. 2004. Design and modeling of the power ultrasonic transducers. MP Interconsulting, Le Locle, Switzerland, 131-135.
- Stansfield D. 1991. Underwater electroacoustic transducers. Bath University Press, Bath, U.K., 119-141.
- Tokin. 1999. Piezoelectric ceramics Catalog (VR-07JE). Tokyo, Japan, 1-35.
- Winder S. 2002. Analog and digital filter design. Elsevier Inc., Englewood Cliffs, NJ, U.S.A., 49-52.