KFAS 한국수산과학회지 Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences
한수지 50(5), 605-615, 2017

Original Article
Korean J Fish Aquat Sci 50(5),605-615,2017

다중 공진 광대역 음향변환기의 대역폭 개선

이대재*

부경대학교 해양생산시스템관리학부

Bandwidth Improvement of a Multi-resonant Broadband Acoustic Transducer

Dae-Jae Lee*

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

A multi-resonant broadband acoustic transducer with six Tonpilz elements operating at different resonant frequencies in a transducer assembly was fabricated, tested, and analyzed. A compensated transducer, modified by adding series inductance to the developed multi-resonant broadband transducer, was shown to provide improved bandwidth performance with a relatively more uniform frequency response compared with the uncompensated transducer. By controlling the series inductance, flat frequency response characteristics at two frequency bands were obtained over the range 38-52 kHz with 1.1 mH inductance and 50-60 kHz with 0.4 mH inductance. These results suggest that the operating frequency of the developed multi-resonant broadband transducer in a chirp echo sounder can be shifted to a different frequency band that is optimized according to the environment for more effective echo surveys of fishing grounds.

Key words: Multiple resonance, Broadband acoustic transducer, Matching inductance, Bandwidth improvement

서 론

현재까지 대부분의 어군탐지기나 소너(sonar)에서는 수중물표의 탐지능력을 증대시키기 위해 공진주파수 부근의 좁은 주파수 대역에서만 효율적으로 음향 에너지를 송·수신할 수 있도록 설계된 협대역 음향변환기(narrowband acoustic transducer)가 널리 사용되어 왔다(Stansfield, 1991). 그러나, 최근 들어서는 넓은 주파수 대역에 걸쳐 다양한 생물학적 및 음향학적 정보를 수집하고자 하는 산업계의 요구가 증가함에 따라 이에 부합되는 다양한 종류의 광대역 음향변환기(broadband acoustic transducer)가 개발되고 있다(Coates and Maquire, 1989; Ramesh and Ebenezer, 2008; Huang and Paramo, 2011; Airmar, 2013).

지금까지 음향변환기의 head mass 전면에 음향 정합층을 부가적으로 접착시키는 방법(Inoue et al., 1989), Tonpilz 음향변환기의 진동체 구조를 다변화하여 다중공진 모드를 도출하는 방법(Hawkins and Gough, 1996; Yao and Bjorno, 1997; Rajapan, 2002; Kim et al., 2013), 다수의 공진주파수를 갖는 진동체를 평면 배열하여 광대역의 주파수 대역을 생성하는 방법(Kachanov and Sokolov, 2007; Lee, 2014; Lee et al., 2014), 대역통과 정합회로를 이용하여 대역폭을 확장시키는 방법(Coates and Mathams, 1988; Coates, 1991; Stansfield, 1991; Radmanovic and Mancic, 2004) 등의 설계기술을 바탕으로 다양한 광대역 음향변환기가 개발되어 왔다. 이들 기법 중에서 저자(Lee et al., 2014)는 다수의 공진주파수를 갖는 진동체를 조합하여 주파수 대역폭을 증대시키기 위한 연구를 수행하여 왔는데, 이 때, 각 진동체에 대한 공진주파수가 균등하게 설정되지 않으면 송파감도(transmitting voltage response, TVR)의 응답특성에 불규칙한 변동성(ripple)이 출현하는 문제가 발생하였다.

본 연구에서는 이와 같은 문제를 개선할 목적으로 공진주파수가 다른 다수의 진동체를 평면 배열하여 다중 공진 음향변환기를 설계한 후, 임의의 주파수 대역에서 평탄한 광대역 송신응답특성을 도출하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 이를 위해 음향변환기에 직렬 정합 인덕턴스를 부가하고, 그 인덕턴스의 변화에 따른 송파감도의 변동특성을 비교, 분석하였다.

https://doi.org/10.5657/KFAS.2017.0605

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial Licens (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 50(5) **605-615,** October **2017**

Received 27 September 2017; **Revised** 7 October 2017; **Accepted** 12 October 2017

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

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

Copyright © 2017 The Korean Society of Fisheries and Aquatic Science

pISSN:0374-8111, eISSN:2287-8815

재료 및 방법

초음파 진동소자의 제작과 배열

본 연구에서는 공진주파수가 서로 다른 6개 주파수의 tonpilz형 진동체를 설계, 제작한 후, Fig. 1a에서와 같이 2×3 패턴으로 배열하여 Fig. 1b의 다중공진 음향변환기를 개발하였다.

Fig. 1a의 tonpilz형 진동체는 외경, 내경 및 두께가 각각 25 mm, 8 mm, 5 mm인 2개의 PZT 세라믹 링(PZ26, Ferroperm Piezoceramics, Denmark)을 서로 전극면이 반대가 되도록 적층한 후, 전면과 후면에 각각 알류미늄 재질의 head mass와 tail mass를 고강력 stud bolt로서 체결한 형태이다. 이들 진동체의 head mass는 가로와 세로가 각각 30 mm, 높이는 주파수에 따라 12-40 mm 범위였다. tail mass는 외경과 내경이 각각 28 mm, 8 mm이었고, 높이는 주파수에 따라 13-20 mm 범위였다. 또한, 체결 stud bolt의 직경 및 길이는 각각 8 mm, 32 mm이었다. 전기펄스신호를 공급하기 위한 전극판의 재질은 인청동으로서, 그 외경, 내경 및 두께는 각각 30 mm, 8 mm, 0.2 mm이었다. 본 연구에서는 Fig. 1a에 나타낸 6개 주파수의 tonpilz형 진동체를 우레탄 고무(scotchcast 2130, 3M, USA) 윈도(window)에 장착한 후, 폴리우레탄으로 수밀, 몰딩 처리하여 다중공진 광대역 음향변환기를 완성하였다.

다중 공진 음향변환기의 전기적인 등가회로

본 연구에서 설계, 제작한 다중 공진 광대역 음향변환기의 전기적인 등가회로는 Fig. 2와 같다(Coates and Maguire, 1989; Ramesh and Ebenezer, 2008; Huang and Paramo, 2011). Fig. 2a의 등가회로에는 Fig. 1에 나타낸 6개의 각 tonpilz 진동소자에 대한 직렬공진 등가회로가 병렬로 접속되어 있는데, 이들 모든 진동소자에 대한 제동용량(clamped capacitance)은 합성정전용량 C_o로서 나타내었다. 이들 각 등가회로 branch에서 전기소자 R, C, L은 각각 저항, 인덕턴스(inductance), 커패시턴스(capacitance)이다. Fig. 2a에는 음원(전력 증폭기)의 출력임피던스 R_s와 음향변환기로부터 방사되는 음향출력의 불규칙

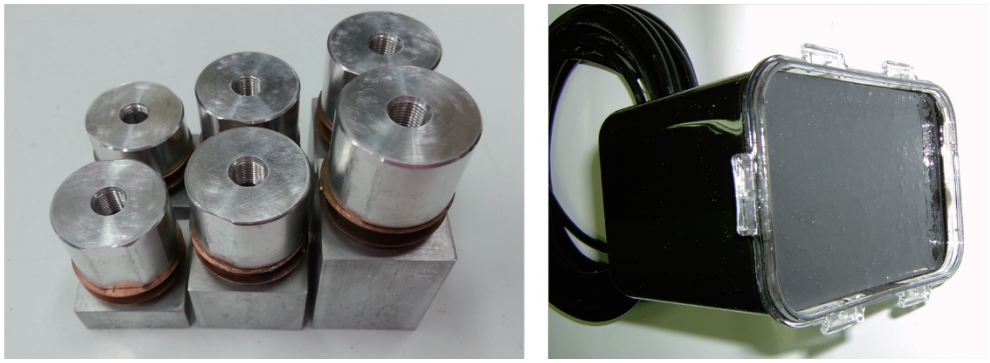

Fig. 1. Photographs of the 6 tonpilz transducer elements operating at different resonance frequencies (a) and the multi-resonant broadband acoustic transducer (b) developed in this study. The transducer elements were arranged in a 2×3 array configuration on the acoustic window of polyurethane.

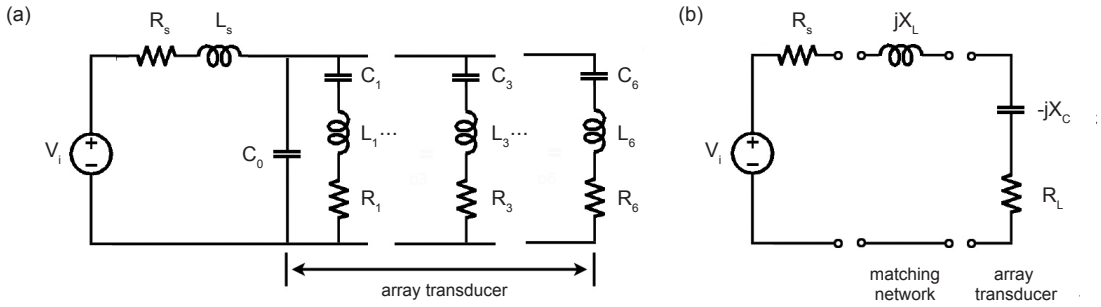

Fig. 2. (a) Electrical equivalent model for a 2×3 array transducer to account for multiple resonant frequencies with a source resistance and a series matching inductor. (b) Series representation of input electrical impedance for a 2×3 array transducer with an inductive reactance for eliminating or minimizing the capacitive reactance in the frequency band of interest.

한 ripple을 보정하기 위한 동조(정합) 인덕턴스(tuning inductance) L_s가 직렬로 접속되어 있다. 한편, Fig. 2b는 Fig. 2a의 다중공진 음향변환기에 대한 복소 전기입력 임피던스(conjugate input electrical impedance) $Z(\omega)$를 실수부의 직렬 resistance $R_L(\omega)$ 와 허수부의 직렬 reactance $X_c(\omega)$로써 나타낸 것이다. 즉, $Z(\omega)$는

$$Z(\omega) = R_L(\omega) + jX_C(\omega) \quad (1)$$

에 의해 표시되고, 임의의 주파수(f)에서 최대의 음향출력을 얻기 위한 정합조건 및 그 때의 직렬 인덕턴스는

$$X_L(\omega) = X_C(\omega) \quad (2)$$

$$L_s(\omega) = \frac{X_C(\omega)}{\omega} \quad (3)$$

에 의해 구할 수 있다. 여기서, ω는 $\omega = 2\pi f$ 이다.

본 연구에서는 (3)식을 이용하여 음향출력의 불규칙한 ripple을 보정하기 위한 동조 인덕턴스 L_s를 구하였다.

일반적으로 종래의 1주파, 또는 다주파 협대역 어군탐지기에서는 각 주파수별로 독립적인 음향변환기를 사용하고 있기 때문에 각 음향변환기의 공진주파수(f_s) 부근에서 최대의 음향출력을 얻기 위한 정합회로가 설계된다. 이 때, 각 음향변환기의 복소 전기입력 임피던스의 허수부인 직렬 reactance $X_C(\omega)$를 소거하거나 최소화시킬 목적으로 음향변환기에 직렬로 정합 인덕터(matching inductor)를 접속한다.

한편, Fig. 2a에 나타낸 6개(i = 1-6)의 모든 진동소자에 대한 음향변환기의 합성 입력 전기 어드미턴스(admittance)를 $Y(\omega)$, 컨덕턴스(conductance)를 $G_{pi}(\omega)$, 서셉턴스(susceptance)를 $B_{pi}(\omega)$라 하면, 이들 각 tonpilz 진동소자에 대한 저항 R_i, 인덕턴스 L_i, 커패시턴스 C_i 및 합성정전용량 C_o는 다음 식에 의해 구할 수 있다(Coates and Maguire, 1989; Ramesh and Ebenezer, 2008; Huang and Paramo, 2011).

$$Y(\omega) = \sum_{i=1}^{N} Y_i(\omega) = \sum_{i=1}^{N} \{G_{pi}(\omega) + jB_{pi}(\omega)\} \quad (4)$$

$$G_{pi}(\omega) = \frac{\omega^2 C_i^2 R_i}{\omega^2 C_i^2 R_i^2 + (1 - \omega^2 L_i C_i)} \quad (5)$$

$$B_{pi}(\omega) = \omega C_o + \frac{\omega C_i (1 - \omega^2 L_i C_i)}{\omega^2 C_i^2 R_i^2 + (1 - \omega^2 L_i C_i)} \quad (6)$$

$$R_i = \frac{1}{G_{pi}(\omega_{si})} \quad (7)$$

$$C_o = \frac{\frac{S}{2\pi}}{1 - N + \sum_{i=1}^{N} \frac{\omega_{pi}^2}{\omega_{si}^2}} \quad (8)$$

$$C_i = C_o \left\{ \frac{\omega_{pi}^2}{\omega_{si}^2} - 1 \right\} \quad (9)$$

$$L_i = \frac{1}{\omega_{si}^2 C_i} \quad (10)$$

여기서, f_{si}는 i 번째 tonpilz 진동소자의 직렬 공진주파수($\omega_{si} = 2\pi f_{si}$)이고, f_{pi}는 i 번째 tonpilz 진동소자의 병렬 공진주파수($\omega_{pi} = 2\pi f_{pi}$)이다. 한편, S는 어드미턴스($|Y(\omega)|$) 패턴의 zero 주파수에서부터 시작되는 기울기로서, $S = \frac{d|Y(\omega)|}{d\omega}$에 의해 구할 수 있는데, 본 연구에서는 30 kHz까지의 $d|Y(\omega)|$ 값을 구하여 산출하였다(Coates and Maguire, 1989).

음향변환기의 주파수 응답특성 측정

본 연구에서 설계, 제작한 다중 공진 음향변환기에 대한 수중에서의 전기적인 임피던스와 어드미턴스는 정밀 LCR meter (7600, QuadTech, USA)를 사용하여 측정하였다. 또한, 음향변환기의 송파감도 및 수파감도(receiving sensitivity, SRT)은 대형실험수조(L × B × D, 5 × 6 × 5 m)에서 측정하였다. 즉, 일정한 펄스 폭과 펄스반복주기를 갖는 Fig. 3의 chirp 신호를 미리 생성시켜 임의파형발생기(33120A, HP, USA)의 메모리에 저장시켜 놓은 후, 필요에 따라 이것을 호출하여 사용하였다(Dong and Cui, 2012; Lee et al., 2016). 실험은 Fig. 3의 임의파형발생기로부터 발생시킨 전압 400 mV, 주파수 대역 1-70 kHz의 chirp 신호를 전력 증폭기(2713, B&K, Denmark)에서 증폭한 후, 이 신호를 직렬 동조 인덕터를 경유하여 음향변환기에 공급하였다. 음향변환기에서 방사되는 송신펄스신호는 수중청음기(model 8100, B&K, Denmark)를 사용하여 수신한 후, 측정증폭기(model 2610, B&K, Denmark)를 사용하여 증폭하고, 이 증폭된 신호를 디지털 오실로스코프(DS1530, EZ, Korea) 및 FFT 분석기(3525, AND, Japan)에 수록하였다. 이와 같이 수록한 출력신호를 이용하여 음향변환기의 송파 및 수파 응답특성를 구하였다.

결과 및 고찰

다중 공진 음향변환기의 어드미턴스 특성 및 정합 인덕턴스의 추정

측정 및 계산 어드미턴스의 비교

본 연구에서 개발한 다중공진 음향변환기에는 6개의 서로 다른 주파수에서 동작하는 tonpilz 진동소자가 함께 배열되어 있다. 따라서, 목적하는 주파수 대역에서 균일한 음향출력을 얻기

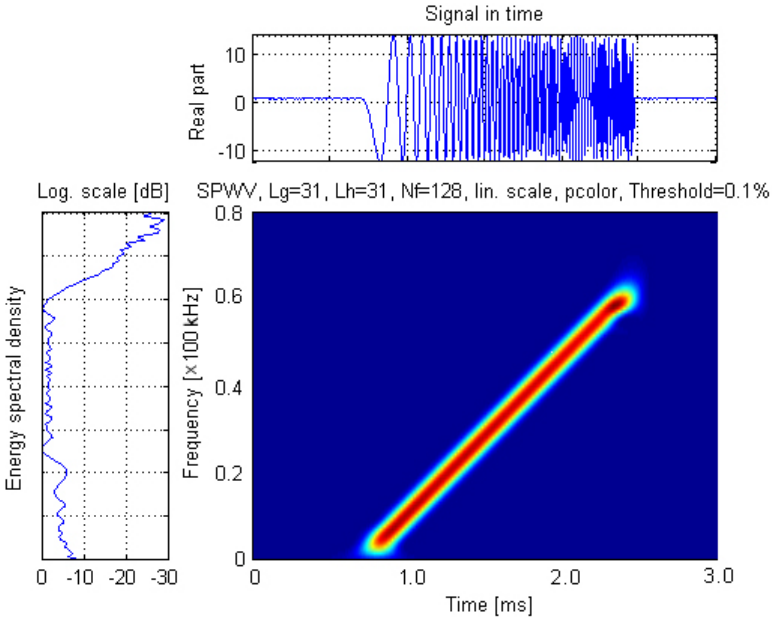

Fig. 3. Time-frequency response characteristic of chirp pulse signal at the electrical terminal of multi-resonant broadband transducer.

위해서는 이들 진동소자로부터 생성된 음향 에너지가 서로 효율적으로 합성(coupling)되어야 한다. 이를 위해 반복적인 실험과 수치 시뮬레이션을 통해 최적의 설계조건을 추출하여 음향변환기를 제작하였는데, 그 전기적인 입력 어드미턴스 패턴은 Fig. 4와 같다. Fig. 4는 다중 공진 음향변환기의 전기입력 어드미턴스 $Y(\omega)$, 어드미턴스의 실수부인 컨덕턴스 $G_p(\omega)$ 및 허수부인 서셉턴스 $B_p(\omega)$ 패턴을 함께 나타낸 결과로서, 종축은 어드미턴스, 컨덕턴스 및 서셉턴스의 진폭(mS)이고, 횡축은 주파수(kHz)이다.

한편, Fig. 4의 어드미턴스의 측정패턴으로부터 다중 공진 음향변환기를 구성하는 각 진동체에 대한 공진(f_{si})과 반공진 주파수(f_{pi})를 구한 결과는 Table 1과 같다.

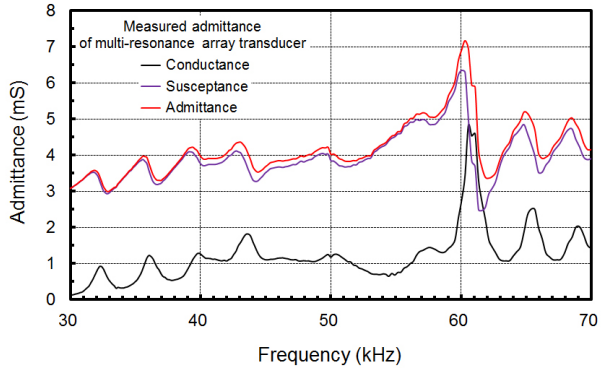

Fig. 4. Measured admittance patterns of the multi-resonant broadband transducer with no tuning. The magnitude of admittance (|Y|) is in red and the conductance and susceptance is in black and purple, respectively.

Table 1의 각 tonpilz 진동체에 대한 공진(f_{si})과 반공진 주파수(f_{pi}), 또한 이들 각 공진 주파수에 대한 컨덕턴스 $G_{pi}(\omega_{si})$ 값을 각각 (7)-(10)식에 대입하여 합성정전용량 C_o과 각 공진모드에 대한 저항 R_i, 인덕턴스 L_i, 커패시턴스 C_i를 계산한 후, (4)식을 이용하여 다중 공진 음향변환기의 어드미턴스 패턴을 수치계산에 의해 구한 결과는 Fig. 5와 같다.

Fig. 5에서 종축은 어드미턴스, 컨덕턴스 및 서셉턴스의 진폭(mS)이고, 횡축은 주파수(kHz)이다. Fig. 4의 어드미턴스의 측정패턴과 Fig. 5의 수치계산에 의한 패턴을 서로 비교해 볼 때, 각 tonpilz 진동체의 기본공진과 반공진 주파수 부근에서는 매우 유사한 경향을 나타내었다. 그러나, Fig. 4의 측정 패턴에 대한 60.3, 65.1 및 68.5 kHz 부근에 출현하는 주파수 응답은 Fig.

Table 1. Resonance (f_s) and anti-resonance frequencies (f_p) obtained from the measured admittance curve (Fig. 4) as a function of length (L) for 6 tonpilz elements of multi-resonant broadband acoustic transducer

Element No.	f_s(kHz)	f_p(kHz)	L(mm)
1	31.84	32.95	70
2	35.57	36.96	60
3	39.40	40.24	54
4	43.08	44.39	48
5	49.79	51.30	44
6	57.06	57.80	35

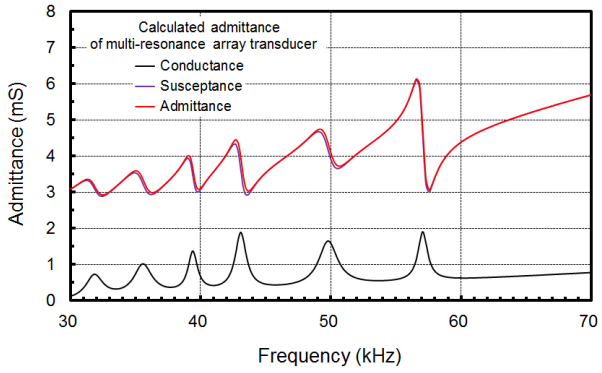

Fig. 5. Calculated admittance patterns of the multi-resonant broadband transducer with no tuning. The magnitude of admittance (|Y|) is in red and the conductance and susceptance is in black and purple, respectively.

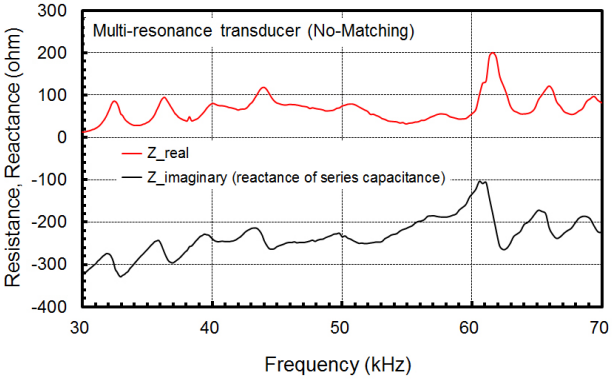

Fig. 6. Measured Impedance patterns of the multi-resonant broadband transducer with no tuning. The resistance is in red and the reactance is in black.

5의 수치 시뮬레이션에서는 출현하지 않았다. 이와 같은 현상은 각 진동체로부터 생성되는 기본진동 이외에도 고차의 종진동, stress bolt에 의한 종진동, 또한, head mass의 flapping 진동 등이 출현하여 이들이 서로 결합됨으로써 나타나는 주파수 응답 특성이라 판단되지만, 이에 대한 분석은 현재 진행 중에 있다. 본 연구에서는 Fig. 4와 Fig. 5에 대한 기본진동에 대한 응답특성만을 대상으로 이들 주파수 대역에서 평탄한 대역폭을 얻기 위한 최적의 직렬 정합 인덕턴스를 도출하였다.

정합 인덕턴스의 추정

음향변환기의 컨덕턴스 패턴은 송파전압감도를 결정하는 중요한 요소가 되는데, 본 연구에서 개발한 음향변환기의 측정 컨덕턴스 패턴에는 Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 매우 불규칙한 변동성(ripple)이 출현하고 있다. 따라서, 우리나라 어선에서 주로 이용하고 저주파수 대역, 특히, 38-50 kHz와 50-60 kHz

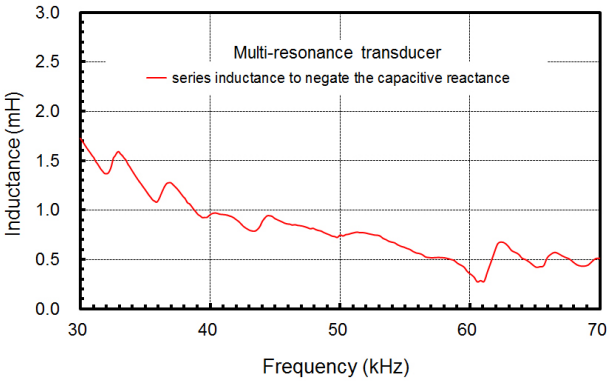

Fig. 7. Change of series inductance values as a function of frequency calculated from an inductive reactance for eliminating the capacitive reactance in Fig. 2(b).

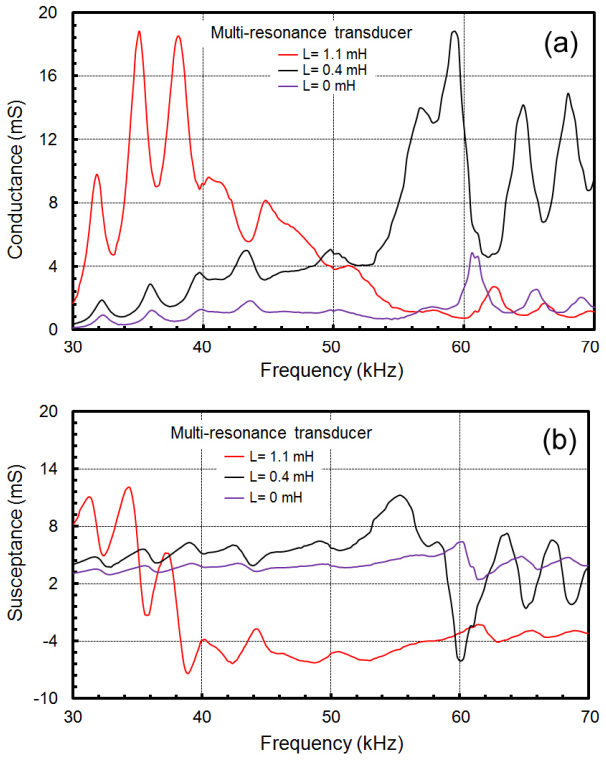

Fig. 8. Measured conductance (a) and susceptance patterns (b) of the multi-resonant broadband transducer with no-tuning (purple), series tuning inductors of 0.4 mH (black) and 1.1 mH (red).

의 두 주파수 대역에서 평탄한 주파수 응답을 얻기 위한 목적으로 다중 공진 음향변환기의 복소 전기입력 임피던스의 직렬 resistance $R_L(\omega)$와 직렬 reactance $X_C(\omega)$을 분석한 결과는 Fig. 6과 같다. 또한, Fig. 6의 직렬 reactance 패턴으로부터 (3)식을 이용하여 동조 인덕턴스 값을 계산한 결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 6에서 종축은 Fig. 2b에 나타낸 음향변환기의 복소 전기입력 임

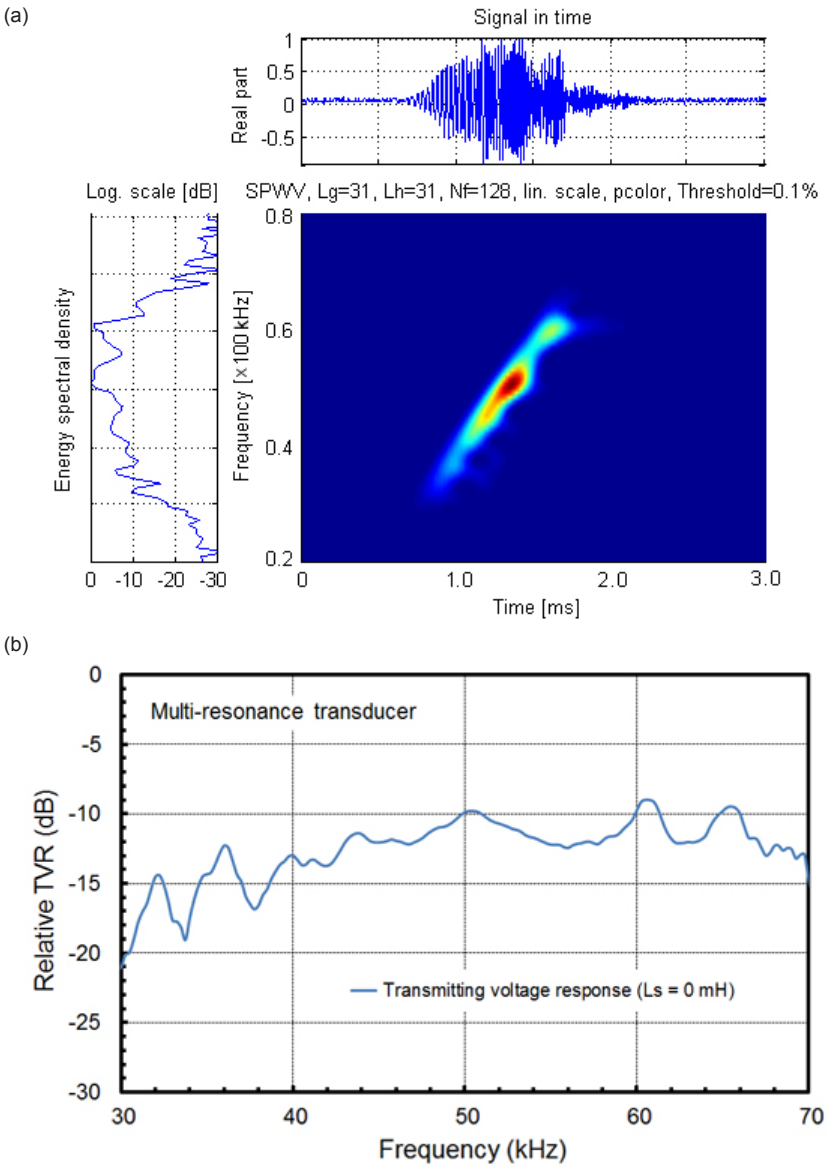

Fig. 9. Transmitting time-frequency response (a) and relative TVR spectrum (b) of the multi-resonant broadband transducer with no tuning.

피던스의 직렬 resistance와 reactance의 진폭이다. 한편, Fig. 7의 종축은 Fig. 2b의 직렬 reactance $X_C(\omega)$을 소거하기 위한 동조 인덕턴스 $L_s(\omega)$의 값으로써, Fig. 6와 Fig. 7에서 횡축은 주파수 (kHz)이다.

Fig. 2b에 나타낸 등가회로를 바탕으로 임의의 주파수에서 최대의 음향출력을 얻기 위해서는 그 주파수에서 $X_L(\omega) = X_C(\omega)$ 및 $R_s = R_L$이 정합조건을 만족시켜야 한다. 이 때, 필요한 Fig. 2a의 동조 인덕턴스 L_s 값은 Fig. 4과 Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이 30-40 kHz와 50-60 kHz의 주파수 영역의 경우, 각각 0.9-1.7 mH와 0.35-0.74 mH 범위이다. 이와 같이 추정된 동조 인덕턴스 값을 바탕으로 송신응답특성을 조사, 분석한 결과, 38-50 kHz 범위에서의 평탄한 주파수 응답특성은 L_s가 L_s = 1.1 mH일 때, 또한, 50-60 kHz 범위에서의 평탄한 주파수 응답특성은 L_s가 L_s = 0.4 mH일 때, 각각 출현하였다.

따라서, 이들 동조 인덕턴스를 Fig. 2a와 같이 직렬로 음향변환기에 접속하고, 입력 전기 어드미턴스 패턴을 측정한 결과는 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서 a와 b는 각각 어드미턴스의 컨덕턴스와 서셉턴스의 주파수 응답패턴이다. Fig. 2a의 다중 공진 등가회로에 L_s = 0.4 mH의 동조 인덕턴스를 접속하면, 컨덕턴스가 30 kHz부터 점차 증가하기 시작하여 54-59 kHz 부근에서 최대

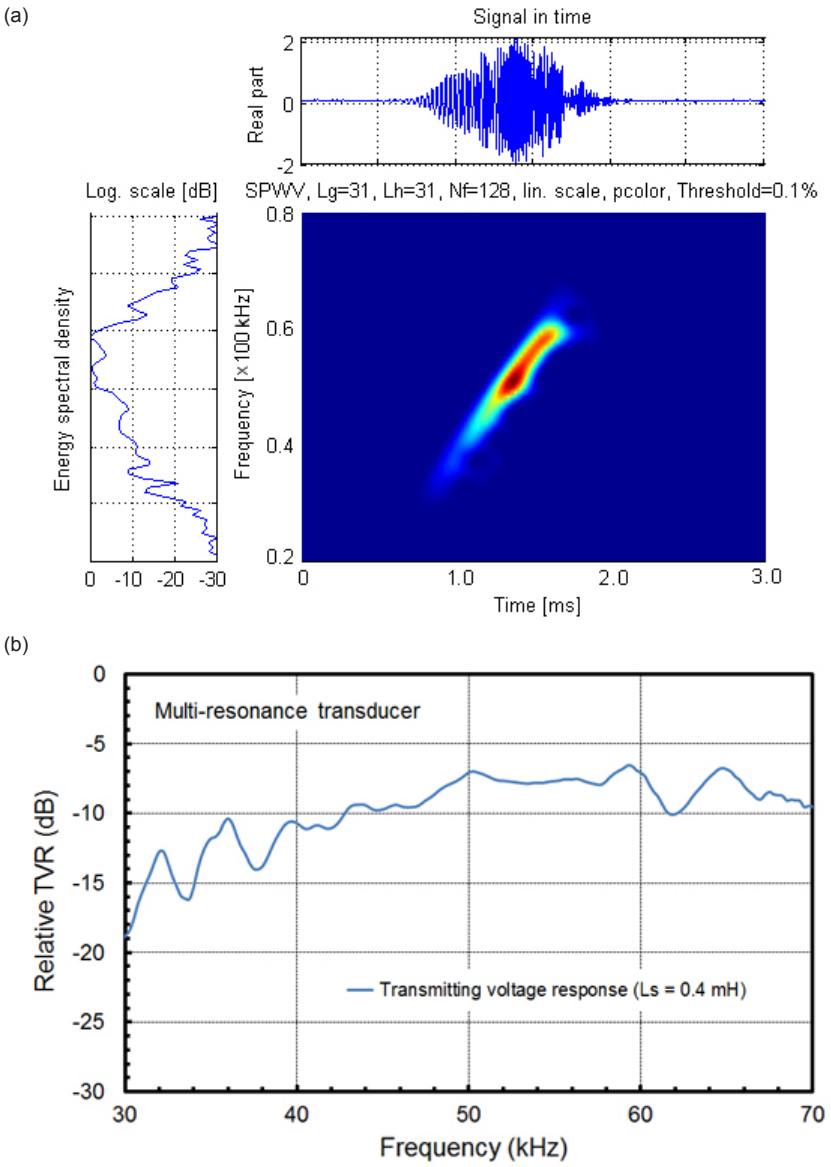

Fig. 10. Transmitting time-frequency response (a) and relative TVR spectrum (b) of the multi-resonant broadband transducer with a 0.4 mH series tuning inductor.

의 응답특성을 나타내었다. 반면, L_s = 1.1 mH를 접속하면, 컨덕턴스가 35-38 kHz 부근에서 최대의 응답특성을 나타낸 후, 주파수의 증가와 더불어 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 즉, 0.4 mH를 접속할 때에는 59kHz 부근에서 강한 동조현상이 발생하고, 1.1 mH를 접속할 때에는 35kHz 부근에서 강한 동조현상이 나타나 다중 공진 음향변환기의 주파수 응답특성이 가변되었다. 본 연구에서는 이와 같이 동조 인덕턴스 값의 변화에 따르는 주파수 응답의 변동을 효과적으로 활용하여 송·수파 응답특성에 출현하는 음향학적 변동성(ripple)을 보정하였다.

다중 공진 음향변환기의 송파 및 수파감도 특성

정합 인덕턴스에 의한 송파감도의 보정

Fig. 2a의 등가회로에 동조 인덕턴스 L_s가 접속되지 않았을 때, 다중 공진 음향변환기의 송신응답특성은 Fig. 9와 같다. Fig. 9에서 a는 수중 청음기에 수신된 음향펄스신호의 시간-주파수 응답특성이고, b는 음향변환기에 공급된 Fig. 3의 전기펄스신호의 주파수 스펙트럼과 Fig. 9a의 음향펄스신호의 주파수 스펙트럼으로부터 계산한 상대적인 송파감도특성이다. Fig. 9a에서 위쪽에는 시간응답파형을, 왼쪽에는 주파수 응답 스펙트럼

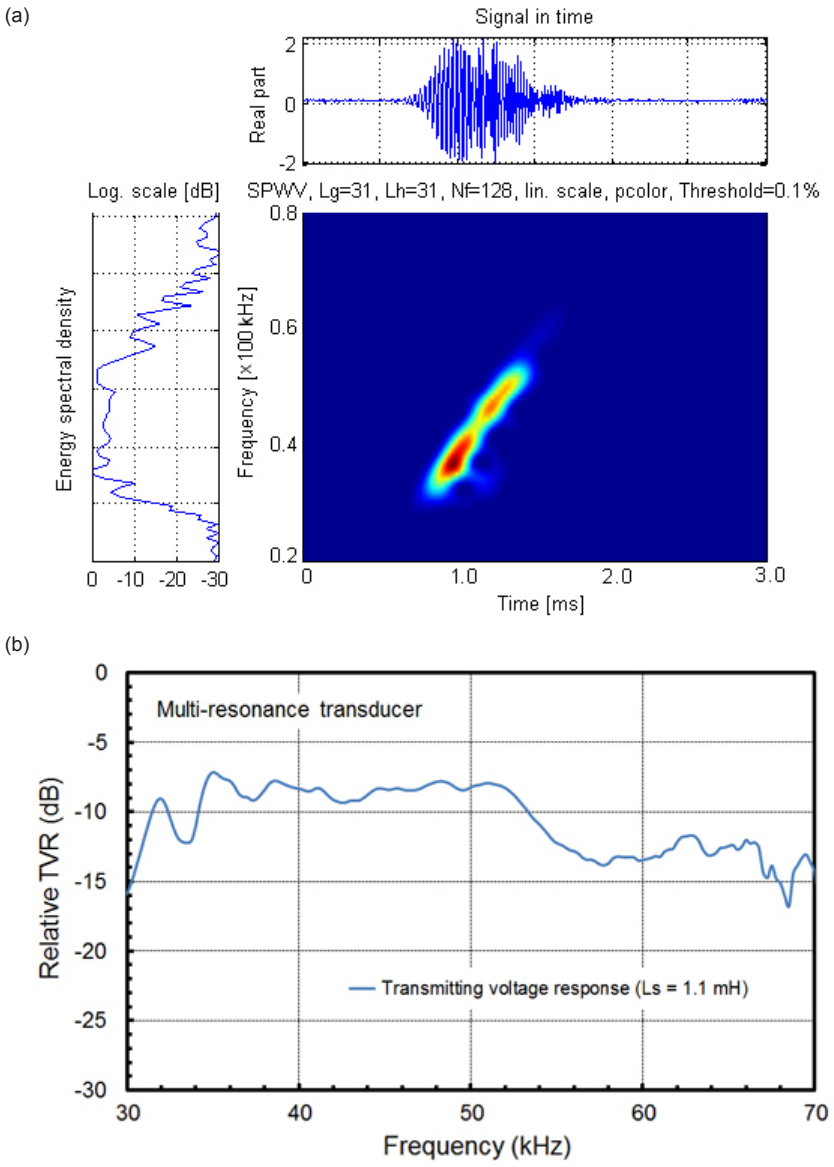

Fig. 11. Transmitting time-frequency response (a) and relative TVR spectrum (b) of the multi-resonant broadband transducer with a 1.1 mH series tuning inductor.

을 함께 나타내었다. 이들 주파수 응답 스펙트럼에서 진폭은 최대값을 0 dB로 정규화하여 0-30 dB 범위에 대하여 나타내었다. Fig. 9b에서 동조 인덕턴스 L_s가 L_s = 0 mH일 때, 음향변환기의 송신응답은 50 kHz와 60 kHz 부근에서 각각 우세하게 출현하였지만, 이들 50-60 kHz의 구간에 대한 평균적인 상대송파감도는 -11.32dB로서, 이 값에 대한 변동성은 -2.70~1.57 dB 범위였다. 또한, 50 kHz 이하의 주파수 영역에서는 주파수가 낮아짐에 따라 송파감도가 완만하게 감소하는 현상이 나타내었다. 특히, Fig. 9에서 40-50 kHz의 구간에 대한 평균적인 상대송파감도는 -12.05dB로서, 이 값에 대한 변동성은 -3.86~2.17 dB 범위였다. 즉, 다중 공진 음향변환기에 내장된 6개의 각 진동소자에서 생성된 음향출력이 서로 보강 및 상쇄간섭을 일으켜 송신응답특성에 매우 불규칙한 변동성이 발생하였음을 알 수 있었다.

본 연구에서는 Fig. 2a의 등가회로에 접속된 동조 인덕턴스 L_s를 활용하여 Fig. 9의 송신응답패턴에 나타나는 불규칙한 변동성을 보정하였는데, 그 결과는 Fig. 10 및 Fig. 11과 같다. 먼저, Fig. 10는 Fig. 9의 송신응답특성에서 50 kHz와 60 kHz 사이의 주파수 구간에서 송파감도가 급격하게 감소하는 변동성을 보정한 결과이다. 즉, Fig. 7의 동조 인덕턴스의 보상곡선으로부터 Fig. 9의 50 kHz와 60 kHz 사이의 주파수 구간에 대한 직

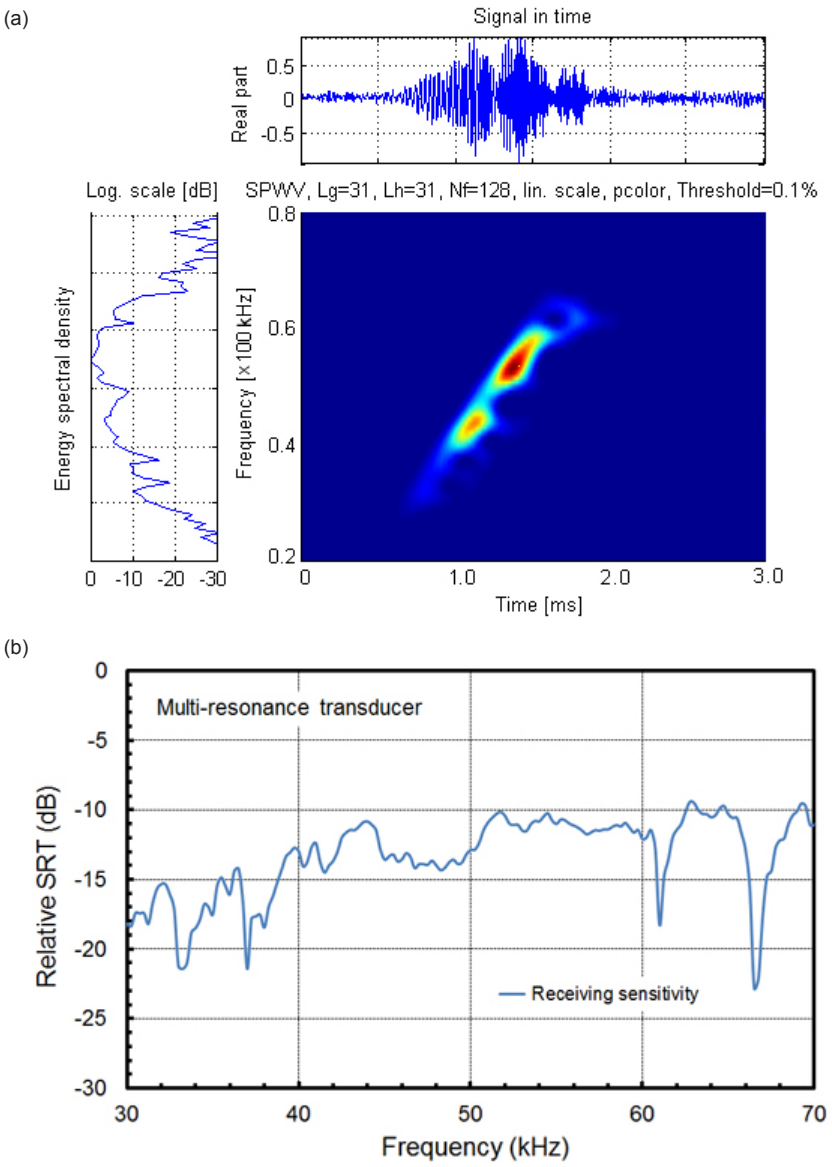

Fig. 12. Receiving time-frequency response (a) and relative SRT spectrum (b) of the multi-resonant broadband transducer.

렬 reactance $X_c(\omega)$을 보정하기 위한 최적의 L_s 값(0.4 mH)을 추출한 후, 이 인덕터를 Fig. 2a의 등가회로에 접속시켜 송파감도를 측정한 결과이다. Fig. 10에서 a는 수중 청음기에 수신된 음향펄스신호의 시간-주파수 응답특성이고, b는 음향변환기에 공급된 Fig. 3의 전기펄스신호의 주파수 스펙트럼과 Fig. 10a의 음향펄스신호의 주파수 스펙트럼으로부터 계산한 상대적인 송파감도특성이다. Fig. 10a에서 위쪽에는 시간응답파형을, 왼쪽에는 주파수 응답 스펙트럼을 함께 나타내었다. 이들 주파수 응답 스펙트럼에서 진폭은 최대값을 0 dB로 정규화하여 0-30 dB 범위에 대하여 나타내었다. Fig. 8a에서 알 수 있는 바와 같이 Fig. 2a의 등가회로에 동조 인덕턴스 L_s = 0.4 mH가 접속되면, 54-59 kHz 부근에서 음향출력의 강한 동조현상이 초래됨으로써 Fig. 9의 50 kHz와 60 kHz 사이의 주파수 구간에 대한 송신출력이 보강되는 현상이 나타났다. 즉, 등가회로에 부가된 인덕턴스에 의한 진동성분이 음향변환기 자체의 진동성분과 동조현상을 일으켜 50 kHz와 60 kHz 사이의 주파수 구간에서 매우 평탄한 주파수 응답특성이 출현하였다. 이 때, Fig. 10의 50-60 kHz 주파수 구간에 대한 평균적인 상대송파감도는 -7.48 dB이었고, 또한, 이 값을 기준으로 한 변동성은 -1.38～0.93 dB 범위였다. 즉, 동조 인덕턴스 L_s = 0 mH일 때보다 송파감도는 약 3.84 dB 증가되었고, 그 변동성은 46% 감소하였다.

한편, Fig. 11은 Fig. 9의 송신응답패턴에서 50 kHz 이하의 주

파수 영역에 대한 송파감도의 변동성을 보정한 결과이다. 즉, Fig. 7의 동조 인덕턴스의 보상곡선으로부터 Fig. 9의 50 kHz 이하의 주파수 구간에 대한 직렬 reactance $X_C(\omega)$을 보정하기 위한 최적의 L_s 값(1.1 mH)을 추출한 후, 이 인덕터를 Fig. 2a의 등가회로에 접속시켜 송파감도를 측정한 결과이다. Fig. 11에서 a는 수중 청음기에 수신된 음향펄스신호의 시간-주파수 응답특성이고, b는 음향변환기에 공급된 Fig. 3의 전기펄스신호의 주파수 스펙트럼과 Fig. 11a의 음향펄스신호의 주파수 스펙트럼으로부터 계산한 상대적인 송파감도특성이다. Fig. 11a에서 위쪽에는 시간응답파형을, 왼쪽에는 주파수 응답 스펙트럼을 함께 나타내었다. 이들 주파수 응답 스펙트럼에서 진폭은 최대값을 0 dB로 정규화하여 0-30 dB 범위에 대하여 나타내었다. Fig. 8a에서 알 수 있는 바와 같이 Fig. 2a의 등가회로에 동조 인덕턴스 L_s = 1.1 mH가 접속되면, 35-38 kHz 부근에서 음향출력의 강한 동조현상이 초래됨으로써 Fig. 11의 35 kHz와 52 kHz 사이의 주파수 구간에 대한 송신출력이 보강되는 현상이 나타났다. 즉, 등가회로에 부가된 인덕턴스의 영향으로 음향변환기의 주파수 응답특성에 보강간섭이 초래되어 38 kHz와 52 kHz 사이의 주파수 구간에서 매우 평탄한 주파수 응답특성이 출현하였다. 이 때, Fig. 11의 40-50 kHz 주파수 구간에 대한 평균적인 상대송파감도는 -8.43 dB이었고, 또한, 이 값을 기준으로 한 변동성은 -1.55～0.63 dB 범위였다. 즉, 동조 인덕턴스 L_s = 0 mH일 때보다 송파감도는 약 3.62 dB 증가되었고, 그 변동성은 64% 감소하였다.

다중 공진 음향변환기의 수파감도 특성

본 연구에서 개발한 다중공진 음향변환기의 상대적인 수파감도는 Fig. 12와 같다. Fig. 12에서 a는 음향 변화기에 의해 수신한 전기펄스신호의 시간-주파수 응답특성이고, b는 음향변환기와 수중 청음기에 수신된 펄스신호의 스펙트럼으로부터 계산한 상대적인 수파감도 특성이다. Fig. 12a에서 위쪽에는 시간응답파형을, 왼쪽에는 주파수 응답 스펙트럼을 함께 나타내었다. 또한, 이들 주파수 응답 스펙트럼에서 진폭은 최대값을 0 dB로 정규화하여 0-30 dB 범위에 대하여 나타내었다.

Fig. 12에서 50-60 kHz의 주파수 구간에 대한 평균적인 상대 수파감도는 -11.21dB로서, 이 값에 대한 수신응답특성의 변동성은 -2.72~1.06 dB 범위였다. 한편, 40-50 kHz의 주파수 구간에 대한 평균적인 상대 수파감도는 -13.09dB로서, 이 값에 대한 수신응답특성의 변동성은 -3.66~2.26 dB 범위였다.

다중 공진 음향변환기의 FOM 특성

본 연구에서 개발한 다중 공진 음향변환기의 FOM 응답특성은 Fig. 13과 같다.

Fig. 13에서 FOM 응답특성은 Fig. 9-Fig. 11의 송신감도(TVR)와 Fig. 12의 수신감도(SRT)의 합(TVR+SRT)에 의해 정의되는 값이다. Fig. 13의 a는 Fig. 2a의 등가회로에 동조 인덕턴스 L_s가 접속되지 않았을 때의 FOM 응답특성이고, (b)와 (c)는 각각 L_s = 0.4 mH 및 L_s = 1.1 mH의 동조 인덕턴스가 접속되었을 때의 FOM 응답특성이다. Fig. 13에서 종축은 FOM 응답레벨(dB)이고, 횡축은 주파수(kHz)이다. Fig. 13에서 L_s = 0 mH일 때의 40-50 kHz의 주파수 구간에 대한 평균적인 FOM 응답레벨은 -25.14dB로서, 이 값에 대한 FOM의 변동성은 -5.75～2.86 dB 범위였다. 또한, 50-60 kHz의 주파수 구간에 대한 평균적인 FOM 응답레벨은 -22.53dB로서, 이 값에 대한 FOM 변동성은 -3.1～1.77 dB 범위였다. 한편, Fig. 2a의 등가회로에 동조 인덕턴스 L_s = 0.4 mH가 접속되었을 때, 50-60 kHz의 주파수 구간에 대한 평균적인 FOM 응답레벨은 -18.69dB로서, 이 값에 대한 FOM 변동성은 -2.23～1.00 dB 범위였다. 또한, Fig. 2a의 등가회로에 동조 인덕턴스 L_s = 1.1 mH가 접속되었을 때,

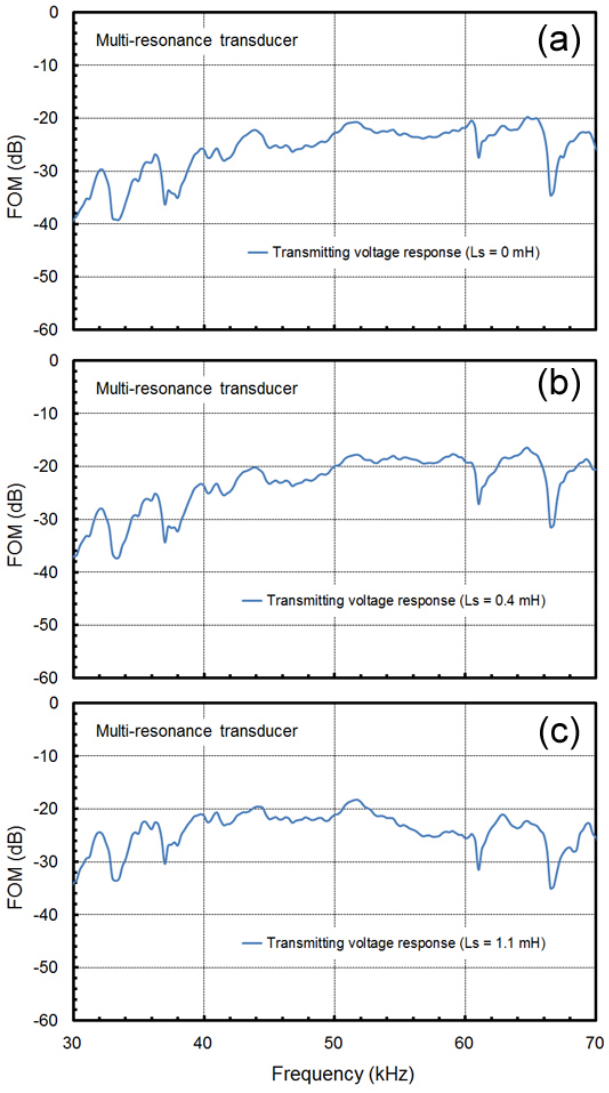

Fig. 13. Comparison of FOM performance characteristics for the multi-resonant broadband transducer without (a) and with 0.4 mH (b) and 1.1 mH (c) tuning inductors.

40-50 kHz 구간 평균 FOM 응답레벨은 -21.59dB로서, 이 값에 대한 변동성은 -3.48～1.98 dB 범위였다. 즉, Fig. 2a의 등가회로에 동조 인덕턴스 0.4 mH와 1.1 mH가 각각 접속되었을 때의 FOM 성능특성은 그것을 접속하지 않았을 때보다 응답레벨은 각각 50-60 kHz 구간에서 3.84 dB, 30-40 kHz 구간에서 3.55 dB 증가하였다. 또한, 그 변동성은 각각 50-60 kHz 구간에서는 34%, 30-40 kHz 구간에서는 37% 감소하였다.

사 사

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

References

Airmar technology corporation. 2013. Technical data catalog, Milford, NH, U.S.A., 274-325.

Coates R. 1991. The design of transducers and arrays for underwater data transmission. IEEE J Ocean Eng 16, 123-135. http://dx.doi.org/10.1109/48.64891.

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.

Hawkins DW and Gough PT. 1996. Multiresonance design of a Tonpilz transducer using the finite element method. IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Contr 40, 782-789.

Huang H and Paramo D. 2011. Broadband electrical matching impedance for piezoelectric ultrasonic transducers. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr Freq Control 58, 2699-2707. http://dx.doi.org/10.1109/TUFFC.2011.2132.

Inoue T, Nada T, Tsuchiya T, Nakanishi T, Miyama T, Takahashi S and Konno M. 1989. Tonpilz piezoelectric transducer with acoustic matching plates for underwater colour image transmission. Acoust Imaging 17, 597-607.

Kachanov VK and Sokolov IV. 2007. Requirement for choosing the parameters of broadband transducers for testing objects with high damping of ultrasonic signals. Russian J Nondestr Test 43, 743-754. http://dx.doi.org/10.1134/S1061830907110058.

Kim JW, Kim HY and Roh YG. 2013. Design and fabrication of multi-mode wideband Tonpilz transducers. J Acoust Soc Kor 32, 191-198. http://dx.doi.org/10.7776/ASK.2013.32.3.191.

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, Kwak MS and Kang HY. 2014. Design and development of the broadband ultrasonic transducer operating over the frequency range of 40 kHz 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.

Radmanovic M and Mancic D. 2004. Design and modeling of the power ultrasonic transducers. MP Interconsulting, Le Locle, Switzerland, 15-135.

Rajapan D. 2002. Performance of a low-frequency, multi-resonant broadband Tonpilz transducer. J Acoust Soc Am 111, 1692-1694. http://dx.doi.org/10.1121/1.1456927.

Ramesh R and Ebenezer DD. 2008. Equivalent circuit for broadband underwater transducer. IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Contr 55, 2079-2083. http://dx.doi.org/10.1109/TUFFC.899.

Stansfield D. 1991. Underwater electroacoustic transducers. Bath University Press, Bath, UK, 119-141.

Yao Q and Bjorno L. 1997. Broadband Tonpilz underwater acoustic transducers based on multimode optimation. IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Contr 44, 1060-1066.