



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

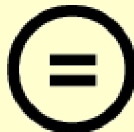
다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이학석사 학위논문

어군탐지기용 다중공진 초음파 변환기의 설계 및 성능특성



2014년 6월

부경대학교 대학원

어업생산학과

곽민선

이학석사 학위논문

어군탐지기용 다중공진 초음파 변환기의 설계 및 성능특성

지도교수 이 대 재

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함.



2014년 6월

부경대학교 대학원

어업생산학과

곽민선

곽민선의 이학석사 학위논문을 인준함.

2014년 6월 일



주 심 수 산 학 박 사 신 현 옥 (인)

위 원 수 산 학 박 사 이 경 훈 (인)

위 원 수 산 학 박 사 이 대 재 (인)

목 차

Abstract

서 론	1
재료 및 방법	3
1. 1차원 tonpilz형 초음파 변환기의 설계 이론	3
2. Tonpilz형 초음파 진동소자의 제작	6
3. 평면배열 다중공진 광대역 초음파 변환기의 제작	8
4. 다중공진 광대역 초음파 변환기의 성능특성 측정	9
결과 및 고찰	13
1. Tonpilz형 단일 초음파 진동소자의 배열 및 진동특성	13
2. 다중공진 광대역 초음파 변환기의 어드미턴스 특성	16
3. 다중공진 초음파 변환기의 송파감도	19
4. 다중공진 초음파 변환기의 수파감도	22
5. 다중공진 초음파 변환기의 지향특성	25

6. 다중공진 초음파 변환기의 펄스응답특성	27
요 약	29
감사의 글	31
참고 문헌	32



Design and performance characteristics of multi-resonant ultrasonic transducer for use in an echo sounder

Min Son Kwak

*Department of Fishery Production, The Graduate School,
Pukyong National University*

Abstract

The objective of this study was to design and develop the broadband ultrasonic transducer that have both the wide bandwidth and the high sensitivity for use in the measurement of broadband echoes related to the fish species identification. The design parameters of single tonpilz transducer element were obtained using the apparent elasticity method and a one-dimensional electro-mechanical model of ultrasonic sandwich type transducer. A broadband ultrasonic transducer providing a nearly flat transmitting response band from 40.2 kHz to 75.5 kHz with a -12 dB bandwidth of 35.3 kHz was achieved by integrating 12 tonpilz transducer elements operating at different resonance frequencies. The averaged TVR (transmitting voltage response), SRT (receiving sensitivity) and FOM (figure of merit) values in this frequency band were 168.4 dB (re 1 Pa/V at 1m), -196.8 dB (re 1 V/ μ Pa) and -28.4 dB, respectively. The results obtained also suggest that the bandwidth and the sensitivity can be widened and improved by adjusting the array pattern and the structure of tonpilz transducer elements.

서 론

수산자원의 효율적 평가를 위하여 초음파 변환기를 이용한 어군탐지기가 널리 사용되고 있다. 어군탐지기는 초음파 변환기를 통하여 전기적 에너지를 음향에너지로 변환하여, 이를 수중으로 전달되어 target에서 반사되어 돌아오는 음향에너지를 초음파 변환기를 통하여 다시 전기적 에너지로 수신하게 된다. 이 전기적 에너지를 해석하여 수중의 자원, 혹은 생태를 파악하는 것이다. 이러한 어군탐지기에서 초음파 변환기는 가장 주요한 분야중 하나이며, 이에 대한 연구는 여러 가지 형태로 진행되고 있다.

우리나라를 비롯한 세계 여러 나라에서는, 28, 50, 75, 200 kHz의 어군탐지기가 널리 보급되어 어업현장 등에서 이들 주파수에 대한 어군탐색, 어군의 분포 및 어군습성 등에 관한 많은 어업생산학적 정보가 축적되어 있다. 하지만 이는 단일한 주파수 대역만을 사용하는 협대역 시스템으로 수중자원의 효과적인 파악을 위해서는 다소 제한적인 부분이 있다. 이를 보완하기 위하여, 과거의 좁은 주파수 대역만을 사용하던 협대역 시스템으로부터 넓은 주파수 대역을 선택적으로, 또는 동시에 사용하는 광대역 시스템으로 그 사용 목적과 활용 범위가 급속하게 변화하고 있는 추세이다. 이와 같이 어업생산분야에서 광대역 어군탐지기의 사용이 점차 일반화되고 있는 배경에는 2010년대에 들어 미국의 Airmar technology사가 chirp (compressed high-intensity radar pulse) 어군탐지기용 광대역 초음파 변환기를 개발하여 상용화하면서부터이다(Airmar, 2013). 이를 계기로 세계 여러 나라에서는 다양한 종류의 chirp 어군탐지기용 초음파 변환기를 개발하여 어업생물

학적 및 해양학적 정보를 정량적으로 수집하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다(Yao et al., 1997; Rajapan, 2002; Kim et al., 2013). 일반적으로 chirp 어군탐지기에서 사용하는 핵심적인 기술은 크게 두 가지로 요약되는데, 첫 번째는 광대역 전기 펄스신호를 수중음향 펄스신호로 변환하거나, 또는 그 반대의 기능을 수행하는 광대역 초음파 변환기의 개발이고(Hawkins et al., 1996; Kachanov et al., 2007; Chen, 2010; Kachanov et al., 2010; Saijyou et al., 2010; Saijyou et al., 2011), 두 번째는 수중의 다양한 어족생물로부터 산란되는 광대역의 초음파 echo 스펙트럼으로부터 목적하는 대상생물의 생물학적 정보를 추출하기 위한 신호처리기술(Lee et al., 2001; Lee et al., 2010; Lee et al., 2011; Lee 2011), 즉 펄스압축 및 신호해석기술이다.

본 연구에서는 어종식별과 관련된 어족생물의 음향학적 산란정보를 넓은 주파수 대역에 걸쳐 동시에 수집한 후, 펄스압축, 시간-주파수 분석 등의 신호처리방법을 통해 각 어종별 고유의 음향학적 식별인자를 추출하기 위한 광대역 초음파 변환기를 실험적으로 설계, 개발하였다. 본 연구에서는 12 종류의 다른 공진주파수에서 구동되는 대칭 구조의 tonpilz형 진동소자를 3×4 패턴으로 평면 배열한 다중공진 광대역 초음파 변환기의 설계하고, 송수파 감도, 지향특성 및 펄스응답특성 등의 초음파 변환기의 고유 특성에 대하여 보고한다(Lee et al., 2014).

재료 및 방법

1. 1차원 tonpilz형 초음파 변환기의 설계이론

본 연구에서 다중공진 광대역 초음파 변환기의 개발에 사용하기 위한 단일 tonpilz형 초음파 진동소자는 Fig. 1(a)에서와 같이 압전 세라믹 링의 전면과 후면에 각각 원통형 알루미늄 블록(AL5083)의 head mass와 tail mass를 접합시키고, 이들을 고강력 스틸 볼트로 체결한 sandwich형 진동소자이다(Lin, 2005).

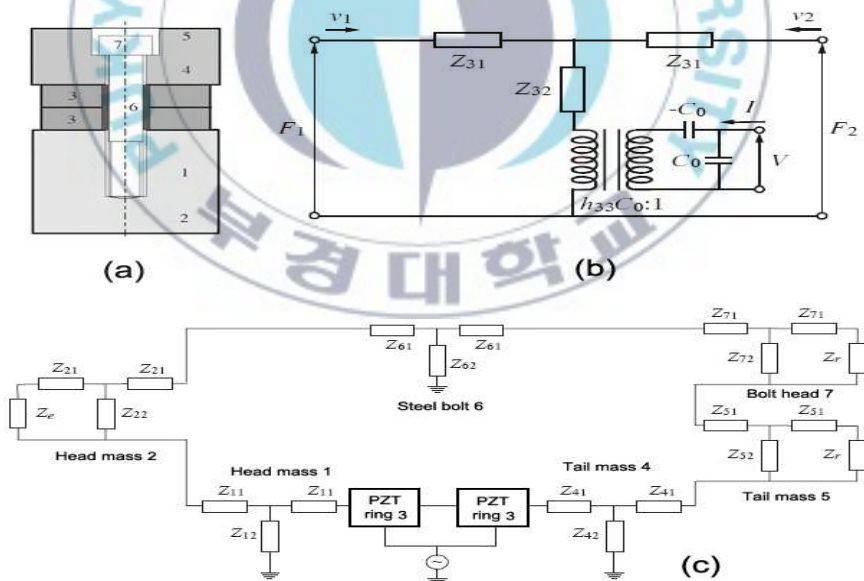


Fig. 1. Geometric diagrams of design model (a), the equivalent circuit of a single piezoelectric ring (b) and the one-dimensional electromechanical model (c) of the ultrasonic tonpilz type transducer (Radmanović et al., 2004).

일반적으로 Fig. 1(a)과 같은 tonpilz형 진동소자에 있어서는 그 횡진동 방향의 직경이 종진동 파장()의 $\lambda/4$ 보다 큰 경우, 이들 종진동과 횡진동이 서로 결합되어 진동소자를 구성하는 각 요소에 대한 탄성계수가 변동하게 되는데, 이로 인해 종진동의 기본공진주파수가 변화한다(Radmanović et al., 2004). 그러나, 본 연구에서는 tonpilz형 진동소자의 PZT 링의 내경, 외경 및 두께와 고강력 체결볼트(prestressed bolt)의 직경 및 길이는 모두 고정시키고, head 및 tail mass의 길이만을 설계 파라미터로 설정하였다. 이 head 및 tail mass의 길이 변화에 따른 공진주파수의 변화를 Fig. 1(c)의 1차원 tonpilz형 진동소자 설계모델(Radmanović et al., 2004)을 이용하여 분석하고 목적하는 주파수별 tonpilz형 진동소자의 치수를 도출하였다. 이 때, 종진동과 횡진동의 coupling 효과(Lin, 1994; Ilua et al., 2002; Feng et al., 2006)에 기인하는 공진주파수의 오차는 임피던스 측정 데이터를 토대로 head 및 tail mass 길이를 동시에 가감하여 최종적인 mass 길이를 추출하고, 이 파라미터를 이용하여 tonpilz형 진동소자를 설계, 제작하였다.

한편, tonpilz형 진동소자의 각 소자를 서로 체결하는 고강력 stud bolt의 head 및 tail mass 체결부의 직경은 각각 8 mm, 또한, 중심부에서의 직경은 6 mm이다. 본 연구에서는 체결볼트가 tonpilz형 진동소자의 종진동에 미치는 영향을 고려하기 위해 1차원 진동소자 설계모델에 stud bolt의 분포 파라미터를 반영하여 계산하였다. Fig. 1(b)에서 압전 세라믹 링에 대한 반경 방향의 횡진동은 무시하고, 두께 방향의 종진동만을 고려할 경우, v_i 는 세라믹 링의 두께 방향에 대한 상측과 하측의 진동면에 작용하는 힘과 진동속도로서, $i=1$ 과 2 는 각각 세라믹 링의 상측과 하측 진동면을 의미하고, I 와 C 는 각각 전기입력단자에 인가된 전압과 전류이다. 또한, C 는 제동용량

(clamped capacitance), h_{33} 는 압전상수, h_{330} 는 초음파 변환기의 전기기계 변환계수, 즉 변성비이다. 한편, 압전 세라믹 링의 전면과 후면에 Fig. 1의 (a)와 같이 알루미늄 블록을 접합시키고, 이들을 고강력 stud bolt로서 체결한 tonpilz형 변환기의 전기입력단자에 송신펄스신호를 인가하면, 이들 구성요소는 서로 일체가 되어 진동한다. 이 초음파 변환기에 대한 전기-기계-음향의 복합적인 1 차원 등가회로는 Fig. 1(c)과 같이 나타낼 수 있고, 이 등가회로의 요소 Z_{i1} , Z_{i2} 는 각각

$$Z_{i1} = jZ_{ci} \tan \frac{k_i l_i}{2}, \quad Z_{i2} = \frac{Z_{ci}}{j \sin k_i l_i} \quad (1)$$

이고, 여기서 Z_{ci} , k_i , l_i 는 각각 i 요소의 특성 임피던스, 파장정수, 두께이다. 또한, $i = 1$ 과 2 는 head mass, $i = 3$ 은 PZT 링, $i = 4$ 와 5 는 tail mass, 그리고 $i = 6$ 과 7 은 체결 stud bolt를 나타낸다. Z_e , Z_r 은 각각 tail mass, head mass 및 bolt head에 작용하는 부하 임피던스이다. 여기서는 초음파 변환기의 성능에 미치는 공기 부하 임피던스의 영향은 매우 작기 때문에 이들 요소는 고려하지 않았다(Hughes et al., 1969). 따라서, 전기 단자의 입력단에서 본 임피던스 Z_{in} 는 $Z_{in} = V/I$ 에 의해 구할 수 있다(Mančić et al., 2002; Mančić et al., 2004; Radmanović et al., 2004; Mančić et al., 2008; Lin et al., 2008; Mančić et al., 2010).

2. Tonpilz형 초음파 진동소자의 제작

본 연구에서는 Fig. 1(c)의 1 차원 등가회로 모델을 이용하여 추출한 설계 파라미터를 이용하여 12 종류의 tonpilz형 초음파 진동소자를 설계, 제작하였는데, 그 모식도는 Fig. 2와 같다. Fig. 2의 tonpilz형 단일 진동소자는 2 개의 PZT 세라믹 링(Pz26, Ferroperm, Denmark)을 서로 전극면이 반대가 되도록 적층한 PZT 블록의 전면에 head mass를, 후면에 tail mass를 고강력 stud bolt로서 체결한 형태로서, PZT 링의 중심에서 볼 때, 그 형상 및 치수는 완전히 상하 대칭인 sandwich형 진동소자이다. 여기서 사용한 PZT 링의 외경(D_3), 내경(D_3) 및 두께(L_3)는 각각 25 mm, 8 mm, 5 mm이고, head mass와 tail mass는 모두 알루미늄제의 원통형 블록으로 그 외경(D_1 D_5)과 내경(D_4)은 각각 30 mm, 8 mm이다. 또한 체결 stud bolt의 직경(D_4) 및 길이(L_4)는 각각 8 mm, 32 mm이지만, L_4 의 길이는 head mass(L_1)와 tail mass(L_2)의 길이에 따라 미세 조정이 가능하도록 하였다.

한편, 2 개의 PZT 링 사이, 또한 PZT 링과 tail mass 사이에는 원형의 전극판을 삽입하고, 여기에 전기신호를 공급하였는데, 이들 전극판의 재질은 인청동으로서, 그 외경, 내경 및 두께는 각각 30 mm, 8 mm, 0.2 mm이다. 특히, 본 연구에서는 30~75 kHz의 주파수 대역에서 사용 가능한 다중공진 광대역 초음파 변환기의 개발을 효율적으로 수행하기 위해 Fig. 2의 tonpilz형 진동소자에서 head mass와 tail mass의 길이 L ($L = L_1 = L_2$)를 제외한 모든 구성요소의 치수는 고정시키고, 단지 L 의 길이만을 12 단계로 가변시켜 서로 다른 공진주파수를 갖는 12 종류의 단일 tonpilz형 진동소자를 설계, 제작하였다.

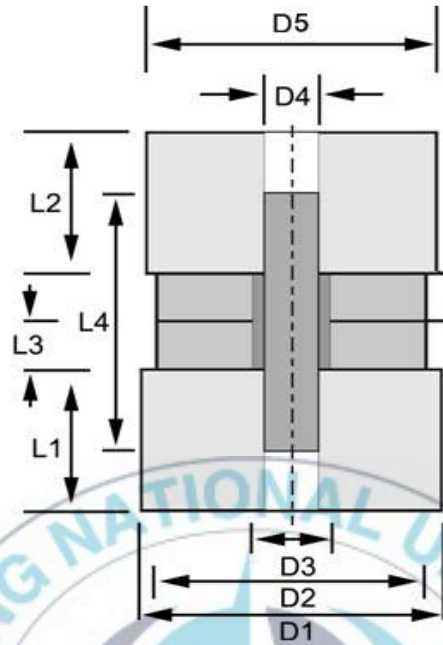


Fig. 2. Determination of size parameter for designing individual tonpilz transducer elements operating at different resonance frequencies.

다중공진 광대역 초음파 변환기의 제작

본 연구에서는 먼저 Fig. 2에서와 같이 직경이 30 mm인 head mass와 tail mass의 길이를 8 mm부터 30 mm까지 2 mm 간격으로 변화시켜 제작한 12 종류의 tonpilz형 진동소자를 평면 배열하여 30~75 kHz 주파수 대역에서 사용 가능한 다중 공진 광대역 초음파 변환기를 제작하였다. 즉, 12 종류의 tonpilz형 진동소자를 폴리우레탄(scotchcast 2130, 3M, USA) window 상에 그 중심 간격이 33 mm가 되도록 3×4 패턴으로 배열하고, 이것을 금형틀 속에 장착한 후, 폴리우레탄으로 수밀 및 몰딩 처리하여 다중공진 광대역 초음파 변환기를 완성하였다. 이 때, tonpilz형 진동소자의 배치는 폴리우레탄 window의 좌측 하단에는 진동소자 길이가 가장 긴 저주파수의 진동소자를, 그리고 우측으로 갈수록 점차 진동소자 길이가 짧은 고주파수의 진동소자를 배치하였고, 또한 하단에서 상단으로 갈수록 진동소자 길이가 짧은 것을 배치하였다. 즉, 좌측 하단에서는 가장 낮은 주파수의 음향 에너지가, 또한, 우측 상단에서는 가장 높은 주파수의 음향 에너지가 방사되도록 하였다.

한편, 본 연구에서 전력증폭기(2713, B&K, Denmark)와 다중공진 광대역 초음파 변환기의 임피던스 정합은 트랜스포머(transformer)를 사용하여 행하였다. 즉, 시중에서 구입이 용이하면서도 목적하는 주파수 대역에 적합한 EI ferrite core (PC40EI33/29/13, TDK, Japan)를 선택하여 정합 트랜스포머를 제작하였다.

4. 다중공진 광대역 초음파 변환기의 성능특성 측정

본 연구에서 설계, 개발한 다중공진 광대역 초음파 변환기에 대한 공기중 및 수중에 있어서의 전기적인 임피던스 및 어드미턴스는 정밀 LCR meter (7600, QuadTech, USA)를 사용하여 측정하였다. 또한, 초음파 변환기의 송파전압감도(transmitting voltage response, TVR)와 수파감도(receiving sensitivity, SRT)는 대형실험수조(L×B×D, 5×6×5 m)에서 측정하였다. 즉, Fig. 3에서와 같이 PC에서 일정한 펄스폭과 펄스반복주기를 갖는 선형주파수변조(linear frequency modulation) 신호, 즉, chirp 신호를 발생시켜 이것을 RS232C 인터페이스를 통해 임의파형발생기(33120A, HP, USA)의 메모리에 전송하여 저장시켜 놓은 후, 필요에 따라 이 chirp 신호를 호출하여 사용하였다. 본 연구에서 이용한 up-chirp 신호 t 는

$$S(t) = A \operatorname{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \sin(2\pi f_s t + \pi \alpha t^2) \quad (2)$$

에 의해 계산하였는데, 여기서, A 는 chirp 펄스신호의 진폭, f_s 는 chirp 펄스신호의 시작 주파수로서, $f_s = f_0 - \frac{\Delta f}{2}$ (f_0 : 중심주파수, Δf : chirp 신호의 주파수 대역폭)이다. 또한, α 는 chirp 펄스신호의 sweep rate로서, chirp 펄스의 폭을 T 라 할 때, $\alpha = \frac{\Delta f}{T}$ 이다. 또한 $0 \leq t \leq T$ 이면, $\operatorname{rect}(\frac{t}{T}) = 1$ 이고, $t \leq 0$ or $t \geq T$ 이면, $\operatorname{rect}(\frac{t}{T}) = 0$ 인 함수이다.

다중공진 광대역 초음파 변환기의 성능 측정 시에는 임의파형발생기에 저장되어 있는 기본 up-chirp 펄스신호를 호출하여 펄스폭 1.8 ms, 전압 1 V, 주파수 대역 1~100 kHz의 chirp 신호로 변조시켜 전력증폭기(2713, B&K, Denmark)에서 증폭한 후, 이 신호를 정합회로(matching network)를 경유하여 초음파 변환기에 인가하였다. 다중공진 광대역 초음파 변환기에서 발사된 송신펄스신호는 수중청음기(8100, B&K, Denmark)를 통해 수신하여 measuring amplifier (2610, B&K, Denmark)에서 증폭한 후, 디지털 오실로스코프(DS1530, EZ, Korea) 및 FFT 분석기(3525, AND, Japan)를 사용하여 송신 및 수신 신호에 대한 시간응답신호와 주파수 스펙트럼 등을 수록하였다.

다중공진 광대역 초음파 변환기의 TVR (dB re 1 Pa/V at 1 m)은 Fig. 3에서와 같이 초음파 변환기에 공급된 chirp 펄스신호의 주파수 스펙트럼과 수중청음기에 수신된 송파신호의 주파수 스펙트럼을 구하여 다음 식으로부터 산출하였다.

$$VR(f) = 20\log(E_r(f)/E_T(f)) - M_R(f) + 20\log(R) \quad (3)$$

여기서, $E_T(f)$ 는 송신 chirp 펄스신호의 주파수 스펙트럼, $E_R(f)$ 는 다중공진 광대역 초음파 변환기에서 송출되는 chirp 송신펄스신호를 음축상 R 만큼 떨어진 위치에서 수중청음기를 이용하여 수신한 음향펄스신호의 주파수 스펙트럼, 또한, $M_R(f)$ 는 수중청음기의 SRT (dB re 1V/ μ Pa), f 는 주파수이다 (Hughes et al., 1969; Hughes, 1998).

한편, 광대역 초음파 변환기의 수파감도를 측정하기 위해서는 측정하고자 하는 광대역 초음파 변환기보다 넓은 주파수 대역폭을 갖는 초음파 변환기가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 그 송·수신 성능특성이 서로 같은 2 set의 다중공진 광대역 초음파 변환기를 설계, 제작하고, 하나는 송신용으로, 다른 하나는 수신용으로 사용하였다. 다중공진 광대역 초음파 변환기의 SRT (dB re 1 V/ μ Pa)는 수중청음기에 의해 수신한 chirp 펄스신호의 주파수 스펙트럼 $H_T(f)$, 다중공진 광대역 초음파 변환기에 의해 측정된 chirp 펄스신호의 주파수 스펙트럼 $H_R(f)$ 를 이용하여 식(4)에 의해 산출하였다.

$$SRT(f) = M_R(f) + 20\log(H_T(f)/H_R(f)) \quad (4)$$

여기서, $M_R(f)$ 는 수중 청음기의 SRT (dB re 1 V/ μ Pa)이고, f 는 주파수이다 (Hughes et al., 1969; Hughes, 1998).

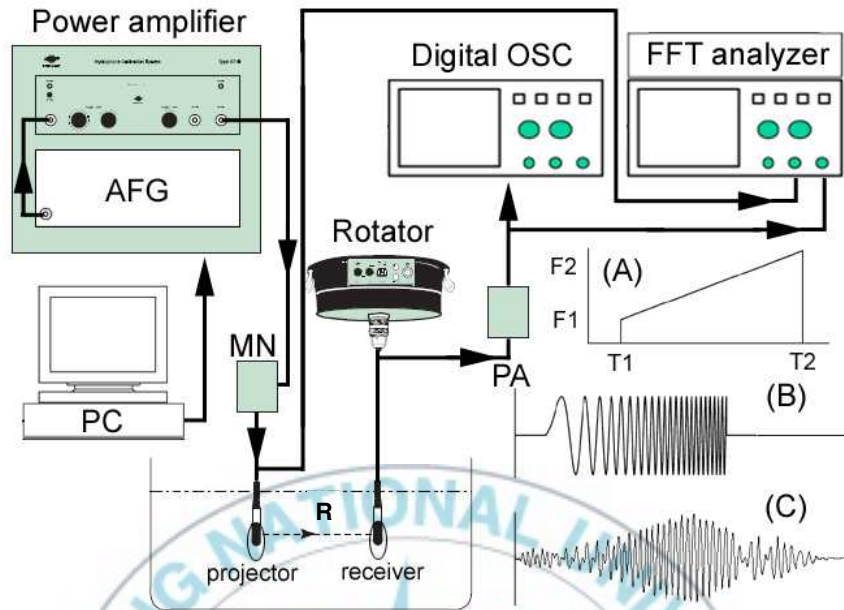


Fig. 3. Schematic diagram of the experimental setup for measuring the underwater performance characteristics of a broadband ultrasonic transducer developed in this study. (A): diagram of time and frequency, (B): transmitted chirp pulse, (C): received chirp response, d: distance between projector and receiver, MN: matching network.

다중공진 광대역 초음파 변환기의 시간응답특성과 송신지향특성은 TVR과 동일한 방법으로 측정하였다. 즉, 광대역 초음파 변환기의 사용가능 주파수 대역을 고려하여 40, 50, 60 및 70 kHz의 공진주파수에서 펄스폭 0.4 ms의 tone burst 펄스신호를 발생시킨 후, 이 직접파 신호를 수중청음기로 수신하여 시간응답특성과 송신지향특성을 분석하였다.

결과 및 고찰

Tonpilz 단일 초음파 진동소자의 배열 및 진동특성

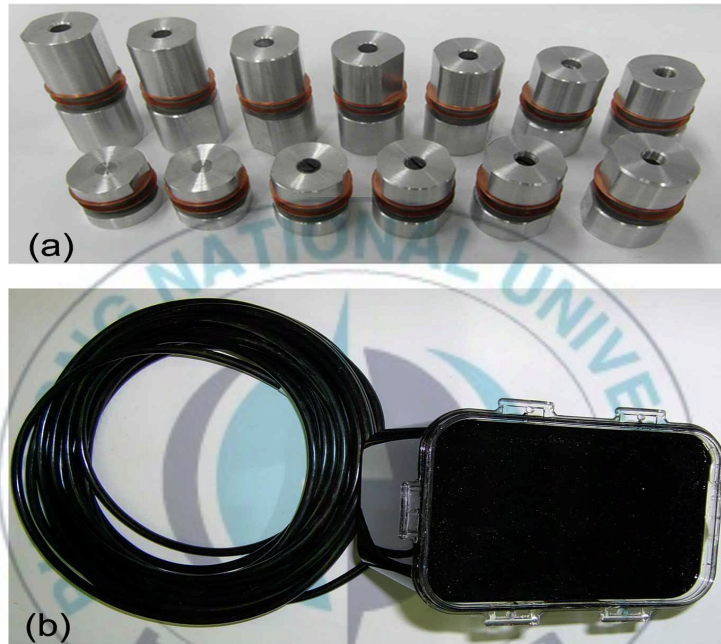


Fig. 4. Photographs of individual tonpilz transducer elements operating at different resonance frequencies (a) and a completed broadband ultrasonic transducer (b) developed in this study. The tonpilz transducer elements were arranged in a 3×4 array configuration with the inter-element spacing of 3 mm on the acoustic window of polyurethane.

다중공진 광대역 초음파 변환기의 설계에 사용하기 위해 독자적으로 개발한 12 종류의 단일 tonpilz형 진동소자와 이들 tonpilz형 진동소자를 평면 배열

하여 실험적으로 제작, 완성한 다중공진 광대역 초음파 변환기의 사진은 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 (a)는 다중공진 광대역 초음파 변환기의 제작에 사용한 공진주파수가 서로 다른 각 치수별 단일 tonpilz형 진동소자이다. 이들 중에서 그 종진동 공진주파수가 30~70 kHz의 주파수 대역에 속하는 12 종류의 tonpilz형 진동소자를 선택하여 폴리우레탄 window 상에 3×4 패턴으로 평면 배열한 후, 수밀 처리하여 완성한 다중공진 광대역 초음파 변환기의 구조와 형상은 Fig. 4(b)와 같다. 이 광대역 초음파 변환기의 가로, 세로 및 높이는 각각 11.5 cm, 18.5 cm 및 11.5 cm이고, 공기 중의 무게는 2.65 kg이다.

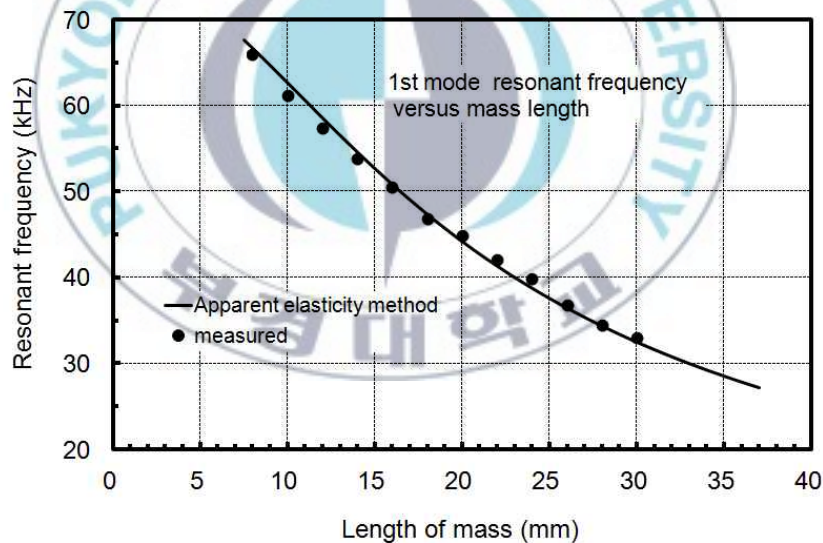


Fig. 5. Comparison of measured and simulated resonance frequencies as a function of mass length for tonpilz transducer elements used in the development of multiple resonance broadband ultrasonic transducer.

한편, Fig. 1(c)의 1차원 전기-기계 등가회로모델의 수치 시뮬레이션에 의해 얻어진 tonpilz형 진동소자의 종진동 모드에 대한 이론적인 기본공진주파수와 그 측정 공진주파수의 관계는 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 실선은 종진동 모드의 기본공진주파수와 head 및 tail mass 길이의 관계를 나타낸 수치 시뮬레이션 결과이고, ●은 Fig. 1(c)의 1 차원 등가회로 모델에 의해 추출된 head 및 tail mass 길이를 토대로 직접 실험실에서 설계, 제작한 단일 tonpilz형 진동소자의 공기 중에 대한 공진주파수의 측정치를 나타낸 것이다. 여기서, 기본공진주파수의 측정치는 LCR meter에 의해 얻어진 전기입력 임피던스의 스펙트럼으로부터, 또한 이론치(실선)는 Fig. 1(c)의 1차원 전기-기계 등가회로모델의 수치계산에 의해 얻어진 전기입력 임피던스의 스펙트럼으로부터 각각 그 진폭이 최소가 되는 주파수를 추적하여 구하였다. 5

서 12 종류의 tonpilz형 진동소자에 대한 종진동 모드의 기본공진주파수는 head mass와 tail mass의 길이가 각각 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30 mm일 때, 각각 67.4, 62.2, 58.2, 54.2, 50.7, 48.4, 45.6, 42.7, 39.8, 37.4, 35.4, 33.5 kHz이었고, 또한, 이들에 대한 횡진동 모드의 공진주파수는 주로 72~77 kHz의 범위에서 나타났다.

광대역 초음파 변환기의 어드미턴스 특성

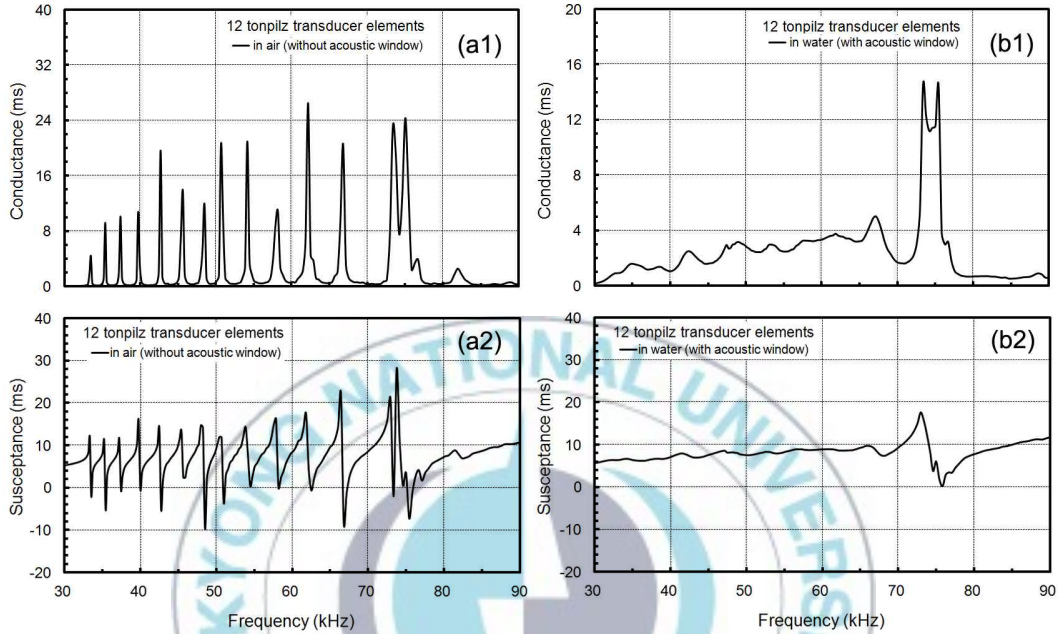


Fig. 6. Comparison of measured admittance curves in air before molding (a1, a2) and in water after molding (b1, b2) for the multiple resonance broadband ultrasonic transducer with 12 different resonances in the frequency band from 30 kHz to 70 kHz.

본 연구에서 개발한 다중공진 광대역 초음파 변환기의 공기 중 및 수중에 서의 conductance 및 susceptance 스펙트럼은 Fig. 6과 같다. Fig. 6의 (a1)과 (a2)는 다중공진 광대역 초음파 변환기를 개발하는데 사용한 12 종류의 tonpilz형 진동소자의 전기입력단자를 서로 병렬접속하고, 공기 중에서의 conductance 및 susceptance를 측정된 결과이다. 또한, Fig. 6의 (b1)과 (b2)는 이들 12 종류의 tonpilz형 진동소자를 폴리우레탄 음향 window상에 평면배열한 후, 수밀 처리하여 완성한 다중공진 광대역 초음파 변환기의 수중

에 대한 conductance 및 susceptance의 측정결과이다. Fig. 6에서 종축은 conductance (ms) 및 susceptance (ms)이고, 횡축은 주파수(kHz)이다.

Fig. 6의 공기 중에 대한 conductance의 주파수 스펙트럼에서 알 수 있는 바와 같이 30~70 kHz의 주파수 대역에서 평균 약 3 kHz의 일정한 간격으로 12 개의 tonpilz형 진동소자에 대한 중진동 모드의 기본공진주파수가 출현하였고, 또한, 75 kHz 부근의 주파수 대역에서도 다른 모드의 공진주파수가 나타났으며, 이는 횡진동 모드에 의한 공진으로 보인다. 이들 단일 tonpilz형 진동소자의 중진동 공진주파수에 대한 conductance 값은 33.5 kHz의 진동소자에서 4.4 ms로서 가장 작았고, 62.2 kHz의 진동소자에서 26.5 ms로서 가장 큰 값을 나타내었다. 또한, head 및 tail mass의 길이가 가장 짧은 66.8 kHz의 진동소자에 대한 conductance 값은 20.6 ms이었다.

한편, Fig. 6에서 (a1)의 수밀 처리하기 전의 공기 중에 대한 합성 conductance 스펙트럼과 (b1)의 수밀 처리하여 완성한 다중공진 광대역 초음파 변환기의 수중에 대한 conductance의 주파수 스펙트럼을 서로 비교해 볼 때, (b1)의 수중에 대한 합성 중진동 특성의 경우, 수중 부하와 음향 window가 서로 일체가 되어 각 진동소자의 중진동 모드가 서로 결합된 결과, 하나의 연속적인 광대역의 conductance 스펙트럼을 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 6의 (b1)에서 head 및 tail mass의 길이가 가장 큰 32.6 kHz의 진동소자로부터 그 길이가 가장 작은 66.8 kHz의 진동소자에 이르기까지 각 진동소자 사이에 약간의 conductance의 불규칙한 ripple은 존재하지만, 대체적으로 주파수가 증가함에 따라 완만하게 증가하는 경향을 나타내었다. 수중에 대한 conductance 값은 32.6 kHz의 진동소자에서 0.86 ms로서 가장 낮았고, 66.8 kHz의 진동소자에서는 5.01ms로서 가장 높은 값을 나타내었다.

한편, 75 kHz 부근에 나타나는 진동 모드에 대한 수중에서의 conductance 값은 14.5 ms이었다.



초음파 변환기의 송파감도

본 연구에서 실험적으로 설계, 개발한 다중공진 광대역 초음파 변환기에 대한 TVR (dB re 1 Pa/V at 1 m)의 주파수 스펙트럼은 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서 TVR의 주파수 의존성은 Fig. 6 (b1)의 수중에 대한 conductance의 주파수 스펙트럼과 거의 일치하는 경향을 나타내었다. 즉, TVR 값은 Fig. 6의 (a1)과 (b1)에서 길이가 가장 큰 진동소자의 공진주파수 (공기 중에서 33.5 kHz, 수중에서 32.2 kHz) 부근에서 152.0 dB의 peak 값을 나타낸 후, 그 값은 주파수와 더불어 연속적으로 증가하는 패턴을 나타내었다. 그 후, 42.5 kHz에서 164.9 dB까지 증가한 다음, 45 kHz부터 72 kHz까지의 주파수 대역에 있어서는 ripple이 매우 작은 평탄한 감도특성을 나타내었다. 그 후, 77.4 kHz에서 152.6 dB까지 급격히 감소하였다가 다시 완만하게 증가하는 변동특성을 나타내었고, 가장 높은 TVR 값은 72.0 kHz에서 173.5 dB이었다. 이 TVR의 최대치를 기준으로 산출한 -6 dB의 하한과 상한 주파수 및 그 TVR 값은 각각 45.2 kHz, 72.3 kHz 및 168.0 dB, 168.7 dB이었다. 즉, -6 dB의 주파수 대역에 대한 평균 TVR 값은 169.6 dB, 주파수 대역폭은 27.1 kHz, 기계적 품질계수(quality factor, Q)는 2.17이었다. 한편, -12 dB의 하한과 상한 주파수 및 그 TVR 값은 각각 40.2 kHz, 75.5 kHz 및 161.8 dB, 161.7 dB이었고, 이들 값으로부터 산출한 -12 dB의 주파수 대역에 대한 평균 TVR 값은 168.4 dB, 주파수 대역폭은 35.3 kHz, Q 값은 1.64이었다. Fig. 6과 Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이 본 연구에서 개발한 광대역 초음파 변환기는 30 kHz에서 70 kHz까지의 주파수 범위에 대하여 약 3 kHz 간격으로 12 종류의 tonpilz형 진동소자를

3×4 패턴으로 평면 배열하여 제작한 관계로, 이 주파수 범위에 국한되어 강한 다중공진특성을 나타내었다. 특히, 40 kHz에서부터 75 kHz까지의 주파수 대역에서는 168.9 dB의 비교적 높고 평탄한 TVR 스펙트럼을 나타내고 있기 때문에 본 연구에서 개발한 광대역 초음파 변환기는 이들 주파수 범위에서 어종식별을 위한 어군 echo 신호를 수록하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

한편, Fig. 6의 수중에 대한 conductance의 주파수 스펙트럼에서 72~77 kHz의 주파수 범위에 출현하는 진동 모드에 대한 TVR 값은 12 개의 tonpilz 형 진동소자의 합성 종진동 모드에 의한 TVR 값과 비교하여 매우 낮았다. 또한, Fig. 6의 conductance의 주파수 스펙트럼에서 77~93 kHz 범위에도 152~159 dB의 TVR 값을 나타내어 이들 주파수 대역 역시 어로 현장에서 어군의 echo 스펙트럼을 수집하는데 활용 가능할 것으로 판단된다.

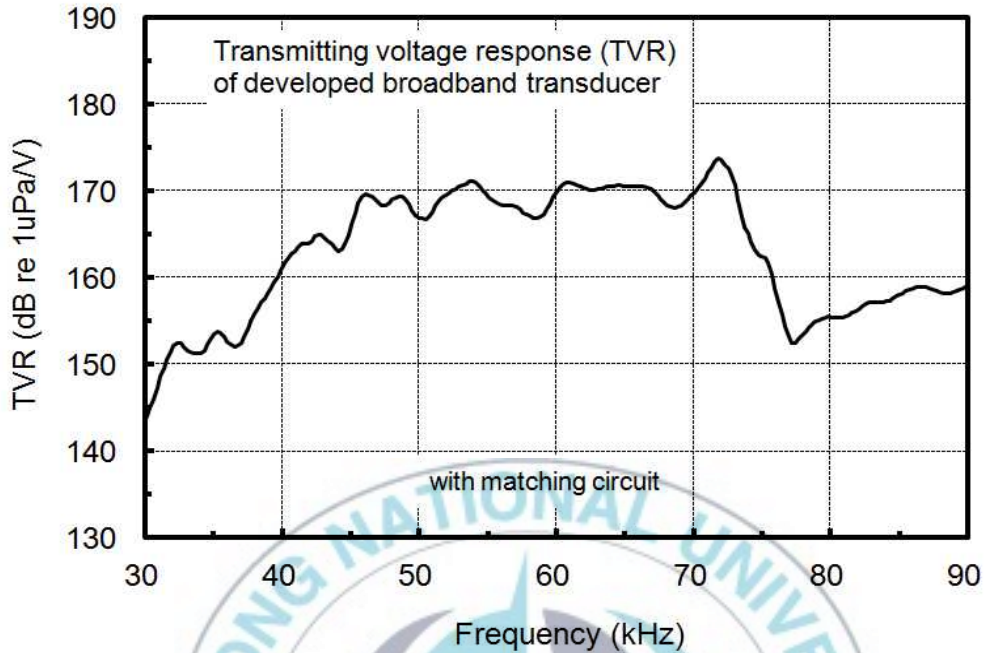


Fig. 7. Transmitting voltage response (TVR) spectrum of the multiple resonance broadband ultrasonic transducer consisting of 12 tonpils transducer elements operating at different resonance frequencies. The TVR spectrum in the frequency band from 45 kHz to 70 kHz has a ripple of less than 6 dB.

본 연구에서 개발한 다중공진 광대역 초음파 변환기를 chirp 어군탐지기의 송·수파기로 사용하는 경우, Fig. 7에서와 같이 주파수 대역폭이 클수록 송신 펄스폭을 짧게 설정할 수 있기 때문에 어군의 식별 분해능을 획기적으로 개선할 수 있는 장점이 있다. 특히, 해저에 밀착하여 분포하여 저서성 어족생물이나 연안의 정착성 어업생물 등을 탐지, 식별하는데 매우 효과적일 것이다. 또한, Fig. 7의 넓은 주파수 대역에 걸쳐 수집되는 echo 스펙트럼에는 어종 고유의 음향학적 및 생물학적 정보가 포함되어 있기 때문에 이 광대역 echo 스펙트럼을 분석하면 어종식별인자를 효과적으로 추출할 수 있다.

초음파 변환기의 수파감도

본 연구에서 실험적으로 설계, 개발한 다중공진 광대역 초음파 변환기에 대한 SRT (dB re 1 V μ Pa)의 주파수 스펙트럼은 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서 광대역 초음파 변환기의 SRT 값은 평면 배열에 사용한 12 개의 tonpilz 형 진동소자 중에서 공진주파수가 가장 낮은 33.5 kHz 부근에서 -188.2 dB 이었다. 그러나, 이 주파수로부터 60 kHz 부근까지 주파수가 증가함에 따라 약간의 불규칙한 ripple은 존재하지만, 대체적으로 완만하게 감소하는 경향을 나타내었고, 60.3 kHz에서 -203.5 dB로서 가장 낮은 값을 나타내었다. 그러나, 60 kHz 부근부터 주파수가 증가함에 따라 다시 SRT 값이 급격히 증가하여 12 개의 진동소자 중에서 공진주파수가 가장 높은 67.4 kHz 부근에서는 -190.1 dB의 높은 값을 나타내었다. 그 후, 75.5 kHz에서 -189.9 dB까지 일시적으로 상승하였다가 다시 감소하는 변동패턴을 나타내고 있음을 알 수 있다.

한편, Fig. 7의 최대 TVR 값에 대한 -6 dB과 -12 dB의 주파수 대역에 있어서의 평균 SRT 값을 Fig. 8에서 구한 결과, -6 dB의 주파수 대역, 즉, 45.2~72.3 kHz 범위에 대한 평균 SRT 값은 -198.1 dB이었고, 또한, -12 dB의 주파수 대역, 즉, 40.2~75.5 kHz 범위에 대한 평균 SRT 값은 -196.8 dB이었다.

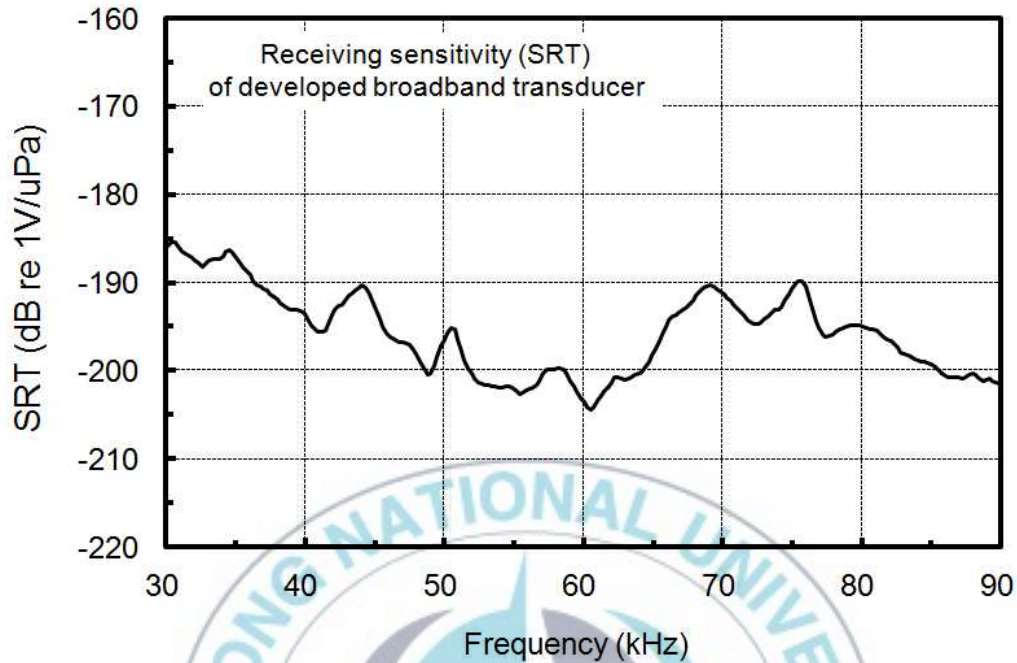


Fig. 8. Receiving sensitivity (SRT) spectrum of the multiple resonance broadband ultrasonic transducer consisting of 12 tonpilz transducer elements operating at different resonance frequencies.

일반적으로 광대역 초음파 변환기의 송·수신 특성을 종합적으로 평가할 때에는 FOM (figure of merit), 즉 송신과 수신 모드의 합성감도 (TVR+SRT)를 분석할 필요가 있다(Kara et al., 2003). 본 연구에서 설계, 개발한 다중공진 광대역 초음파 변환기의 FOM의 주파수 스펙트럼은 Fig. 9와 같다. Fig. 9에서 알 수 있는 바와 같이 12 종류의 각 tonpilz형 진동소자 중에서 head 및 tail mass의 길이가 가장 짧은 진동소자(공진주파수 33.5 kHz)와 그 길이가 가장 큰 진동소자(공진주파수는 67.4 kHz)의 공진주파수 대역에 대한 평균적인 FOM 값은 약 -27.5 dB이었다. FOM의 최대치는

71.9 kHz의 주파수에서 출현하였는데, 그 값은 -20.5 dB이었다. 본 연구에서는 12 종류의 서로 다른 tonpilz형 진동소자를 사용하여 초음파 변환기를 설계, 제작하였기 때문에 Fig. 9의 FOM 스펙트럼에서 다소 불규칙한 ripple이 나타나고 있는데, chirp 어군탐지기의 주파수대역으로 사용 가능한 40~75 kHz의 주파수 대역에 대한 평균 FOM 값은 -28.4 dB이었고, 그 변동 폭은 -12.5 dB이었다.

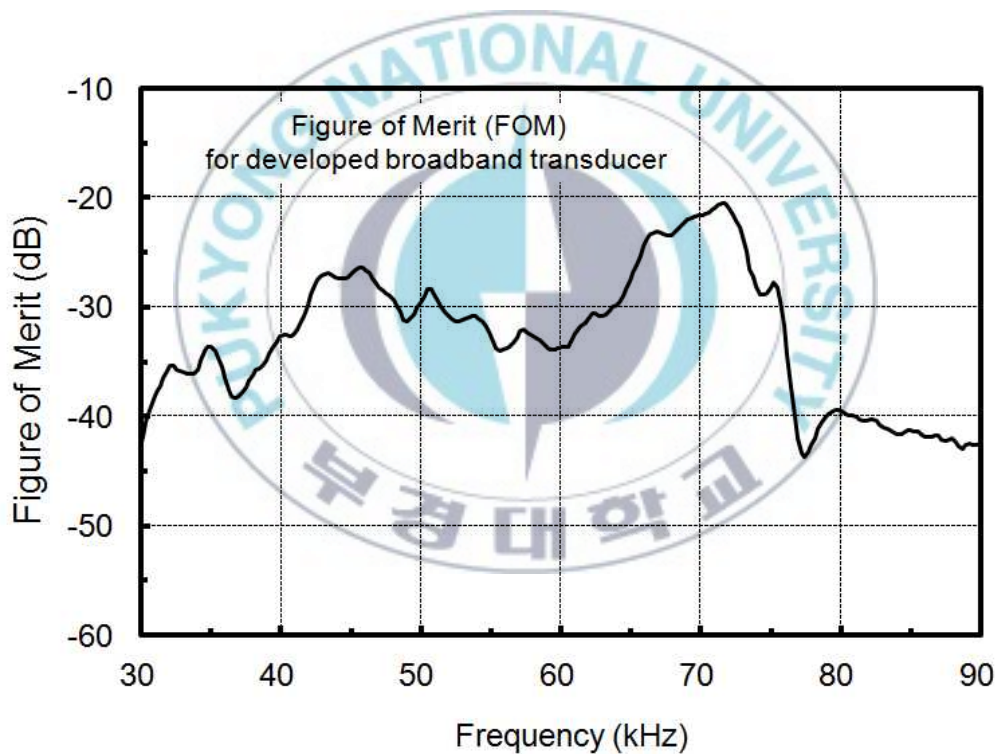


Fig. 9. FOM (Figure of merit) spectrum of the broadband ultrasonic transducer consisting of 12 tonpilz transducer elements operating at different resonance frequencies.

초음파 변환기의 지향특성

다중공진 광대역 초음파 변환기의 송신지향특성은 Fig. 10과 같다. Fig. 10은 40, 50, 60 및 70 kHz의 주파수에 대한 송신지향특성을 나타낸 결과이다. Fig. 10에서 먼저 40 kHz에서의 -3 dB 점에 대한 지향각은 26.4° , 송신 빔의 음축 offset는 5.7° , -3 dB 지향각 범위는 $-6.76^\circ \sim +19.6^\circ$ 이었고, 제 1 측엽(side lobe)에 대한 방향각과 레벨은 각각 -44.2° , -5.04 dB과 45.9° , -6.08 dB이었다. 50 kHz에서의 -3 dB 점에 대한 지향각은 20.26° , 송신 빔의 음축 offset는 0.2° , -3 dB 지향각 범위는 $-8.93^\circ \sim +11.33^\circ$ 이었고, 제 1 측엽에 대한 방향각과 레벨은 각각 -48.2° , -10.19 dB과 -46.0° , -9.54 dB이었다. 60 kHz에서의 -3 dB 점에 대한 지향각은 15.69° , 송신 빔의 음축 offset는 -0.65° , -3 dB 지향각 범위는 $-8.49^\circ \sim +7.2^\circ$ 이었고, 제 1 측엽에 대한 방향각과 레벨은 각각 -23.97° , -6.24 dB과 24.13° , -6.67 dB이었다. 또한, 70 kHz에서의 -3 dB 점에 대한 지향각은 15.48° , 송신 빔의 음축 offset는 1.3° , -3 dB 지향각 범위는 $-9.58^\circ \sim +5.9^\circ$ 이었고, 제 1 측엽에 대한 방향각과 레벨은 각각 -41.62° , -10.31 dB과 18.74° , -12.09 dB 이었다. Fig. 10에서 알 수 있는 바와 같이 40, 50, 60 및 70 kHz의 송신지향성패턴과 Fig. 4(b)의 음향 window 상에 배열된 12 주파수의 단일 진동소자에 대한 배열패턴을 서로 비교하여 고찰할 때, 40 kHz 진동소자는 좌측으로부터 2 번째 열 하단에 위치하고, 60 kHz 진동소자는 가장 우측 하단, 70 kHz 진동소자는 가장 우측 상단에 위치하고 있는 관계로 이들 진동소자는 음원 중심으로부터 좌측 또는 우측으로 벗어나 있기 때문에 좌·우측 송신 빔 패턴이 서로 비대칭적인 형상을

나타내었다. 그러나, 50 kHz 진동소자는 좌측으로부터 3 번째 열 중간의 음
원 중심 부근에 위치하고 있는 관계로 송신 빔 패턴이 비교적 대칭적인 형상
을 나타내었다. 또한, Fig. 10에서 알 수 있는 바와 같이 주파수가 증가함에
따라 -3 dB 점에 대한 지향각이 점차 작아지는 방사패턴을 나타내었다.

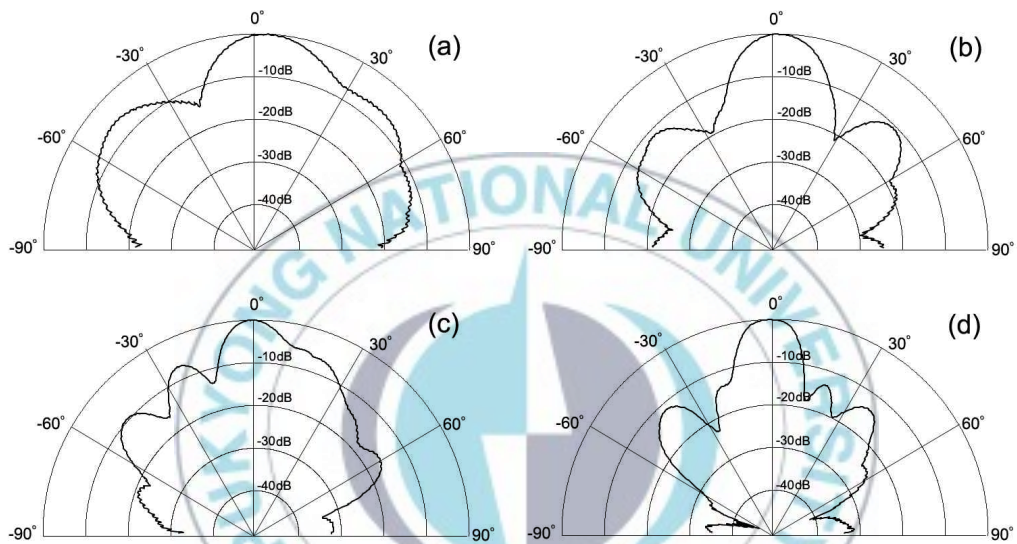


Fig. 10. Measured horizontal beam patterns at 40 kHz (a), 50 kHz (b), 60 kHz (c) and 70 kHz (d) for the multiple resonance broadband ultrasonic transducer consisting of 12 tonpilz transducer elements operating at different resonance frequencies.

초음파 변환기의 펄스응답특성

본 연구에서 개발한 다중공진 광대역 초음파 변환기의 송신펄스신호의 시간응답특성은 Fig. 11과 같다. Fig. 11의 펄스응답신호는 임의 파형발생기에서 발생시킨 펄스폭 약 0.4 ms의 40, 50, 60 및 70 kHz 펄스 신호를 전력 증폭기를 통해 광대역 초음파 변환기에 인가하고, 음축상 약 2.5 m의 거리에서 수중청음기를 이용하여 직접파 신호를 수신한 결과이다. Fig. 11에서 알 수 있는 바와 같이 40, 50 및 60 kHz에 대한 송신펄스신호는 전단부(rising edge)와 후단부(falling edge)에서 거의 수직으로 상승 및 수직 하강하는 응답특성을 나타내고 있는데, 이 응답파형은 초음파 변환기에 입력한 전기펄스 파형과 거의 같아 이들 주파수에서의 펄스응답특성은 매우 우수하다. 그러나, 70 kHz에 대한 응답특성에 있어서는 수신펄스신호의 전단부와 후단부의 각각 약 0.2 ms 시간구간에서 완만하게 상승 및 하강하는 응답특성을 나타내고 있는데, 이 현상은 Fig. 7의 TVR 스펙트럼에서 알 수 있는 바와 같이 70 kHz 부근에 대한 급격한 ripple에 기인하여 초래된 것이라 판단된다.

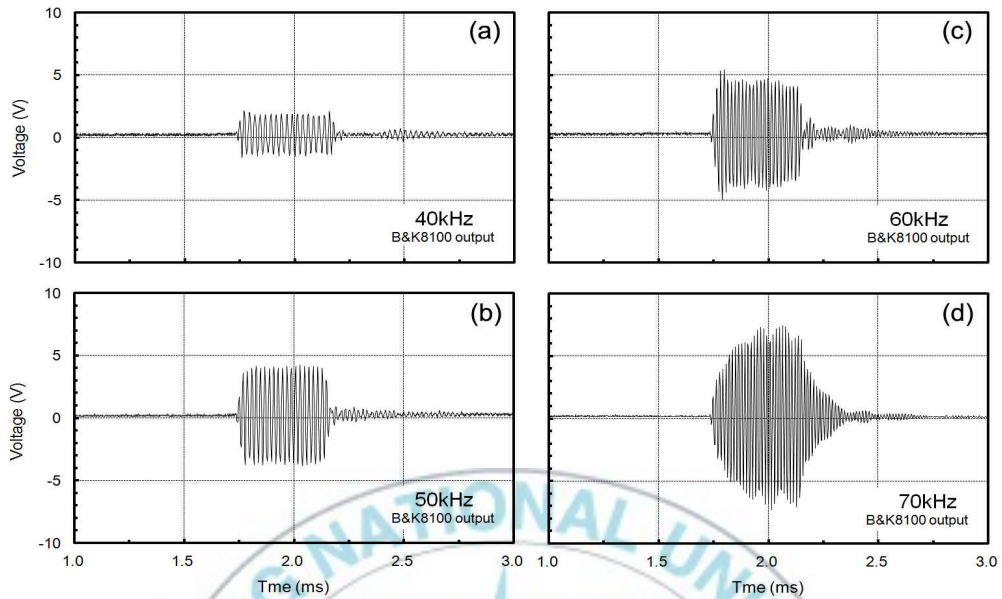


Fig. 11. Measured transmitting pulse responses at 40 kHz (a), 50 kHz (b), 60 kHz (c) and 70 kHz (d) for the broadband ultrasonic transducer consisting of 12 tonpilz transducer elements operating at different resonance frequencies.

한편, Fig. 11의 40, 50, 60 및 70 kHz의 주파수에 대한 펄스응답특성에서 각 주파수에 대한 응답신호의 전압은 각각 3.62, 8.32, 10.88, 14.88 $-p$ 로서, 주파수가 증가함에 따라 그 응답레벨이 증가하는 현상을 나타내었다.

일반적으로 초음파 변환기는 Q 값이 작을수록, 즉, 주파수 대역폭이 넓을수록 송신펄스신호의 전반부에 대한 상승시간(rise time)과 후반부에 대한 하강시간(fall time)이 짧아지는 펄스응답특성을 나타낸다. 특히, 이들 상승과 하강시간을 짧게 하면 어류 echo 신호의 후반부에 긴 꼬리 모양으로 나타나는 ringing 현상이 억제되기 때문에 본 연구에서 개발한 다중공진 광대역 초음파 변환기는 어군탐지기의 식별 분해능을 향상시키는데 크게 기여할 것으로 판단된다.

요 약

본 연구에서는 기존의 좁은 주파수 대역만을 사용하던 협대역 시스템으로부터, 넓은 주파수 대역을 동시에 사용하는 광대역 시스템에 사용할 수 있는 어군탐지용 다중공진 초음파 변환기를 설계, 개발 하였다. 단일 tonpilz 초음파 진동소자의 설계 파라미터 중 head mass와 tail mass의 길이 L 값을 12 단계로 가변시켜, 서로 다른 공진주파수를 갖는 12종류의 단일 tonpilz형 진동소자를 3×4 패턴으로 평면 배열한 후, 수밀 처리하여 다중공진 광대역 초음파 변환기를 제작하여, 그 성능 특성을 고찰한 결과는 다음과 같다.

1. 본 연구에서 개발한 광대역 초음파 변환기는 40 kHz에서부터 75 kHz까지의 주파수 대역에서는 168.9 dB의 비교적 높고 평탄한 TVR 스펙트럼을 나타내고 있기 때문에, 이들 주파수 범위에서 어종식별을 위한 어군 echo 신호를 수록하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.
2. 최대 TVR 값에 대한 -6 dB과 -12 dB의 주파수 대역에 있어서의 평균 SRT 값을 구한 결과, -6 dB의 주파수 대역, 즉, 45.2~72.3 kHz 범위에 대한 평균 SRT 값은 -198.1 dB이었고, 또한, -12 dB의 주파수 대역, 즉, 40.2~75.5 kHz 범위에 대한 평균 SRT 값은 -196.8 dB이었다.
3. 40, 50, 60 및 70 kHz에서의 -3 dB 지향각은 각각, 26.40° , 20.26° , 15.69° , 15.48° 로서 주파수가 증가함에 따라 점차 작아지는 방사패턴을

나타내었다.

4. 40, 50 및 60 kHz에서의 펄스응답은 송신 펄스 신호와 거의 유사한 응답 특성을 나타내었으나, 70 kHz의 펄스응답특성에서는 0.2 ms의 ringing 현상을 나타내고 있는데, 이것은 70 kHz 부근의 TVR 스펙트럼에 나타나는 ripple 현상에 기인한 것이라 판단된다.



감사의 글

이 논문이 나올 수 있도록, 열과 성의를 다해 지도해주신 이대재 교수님께 마음 깊은 곳으로부터 진심으로 존경과 감사의 말씀을 드립니다. 바쁜신 와중에도 세심하게 지도하여 주신 신현옥 교수님, 이경훈 박사님께도 머리 숙여 감사의 말씀 올립니다.

대학원 생활에 있어, 학문적으로 많은 성장을 할 수 있도록 만들어 주신 여러 교수님께 그리고 대학원 선후배 동기들께도 감사의 말씀 전합니다. 바쁜 회사생활 이지만 대학원 생활을 할 수 있도록, 업무 공백 없도록 배려해 주신 신아종합 임직원분들께도 고마운 마음 전합니다.

작년에 새로 태어난 딸 은비와, 논문 핑계로 많은 시간 함께하지 못한 아내에게도 미안함과 사랑의 인사 보냅니다. 항상 못난 자식 걱정애 노심초사 하실 어머니, 아버지께도 존경과 감사의 인사 올립니다.

감사합니다.

참고 문헌

- Airmar technology corporation. 2013. Technical data catalog, Milford, NH, USA, 274-325.
- Chen YC. 2010. Acoustic transmission line model for ultrasonic transducers for wide-bandwidth application. *Acta Mechanica Solida Sinica* 23, 124-134.
- Feng F, Shen J and Den J. 2006. A 2D equivalent circuit of piezoelectric ceramic ring for transducer design. *Ultrasonics* 44, 723-726.
- 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.
- Hughes WJ and Zipparo MJ. 1969. Computer modeling of ultrasonic piezoelectric transducers. Technical report TR 96-007, Applied Research Lab, The Pennsylvania State Univ, Pennsylvania, USA, 1-116.
- Hughes WJ. 1998. Transducer, underwater acoustic. *Encyclopedia of applied physics* 22, 67-84.
- Ilua A, Carotenuto R and Pappalardo M. 2002. An approximated 3-D model of the Langevin transducer and its experimental validation. *J Acoust Soc Am* 111, 2675-2680.
- 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.

- Kachanov VK, Sokolov IV, Konov MM, Timofeev DV and Sinitsyn AA. 2010. Development of a broadband low-frequency mosaic ultrasonic piezoelectric transducer with a limited aperture. *Russian J Nondestr Test* 46, 645-650.
- Kara H, Ramesh R, Stevens R and Browen CR. 2003. Porous PZT ceramic for receiving transducers. *IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Contr* 50, 289-296.
- Kim JW, Kim HY and Roh YG. 2013. Design and fabrication of multi-mode wideband tonpilz transducers. *J Acoust Soc Kor* 32, 191-198.
- Lee DJ. 2011. Estimation of angular location and directivity compensation of split-beam acoustic transducer for a 50 kHz fish sizing echo sounder. *Kor J Fish Aquat Sci* 44, 423-430.
- 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. *Kor J Fish Aquat Sci* 47, 292-301.
- Lee DJ and Lee WS. 2010. Design, fabrication and performance characteristics of a 50kHz tonpilz type transducer with a half-wavelength diameter. *J Kor Soc Fish Tech* 46, 173-183.
- Lee DJ and Lee WS. 2011. Development of split-beam acoustic transducer for a 50 kHz fish sizing echo sounder. *Kor J Fish Aquat Sci* 44, 413-422.
- 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.
- Lin S. 1994. The three-dimensional equivalent circuit and natural frequencies of rectangular piezoelectric ceramic resonators. *J Acoust Soc Am* 96, 1620-1626.

- Lin S. 2005. Analysis of the sandwich piezoelectric ultrasonic transducer in coupled vibration. *J Acoust Soc Am* 117, 653-661.
- Lin S and Hua T. 2008. Study on the sandwich piezoelectric ceramic ultrasonic transducer in thickness vibration. *Smart Mater Struct* 17, 1-9.
- Mančić D and Radmanović M. 2002. Piezoceramic ring loaded on the face: a three-dimensional approach. *Electro J Tech Acoust* 2, 1-7.
- Mančić D and Radmanović M. 2004. Design of ultrasonic transducers by means of the apparent elasticity method. *Working and Living Environmental Protection* 2, 293-300.
- Mančić D, Radmanović M, Petrusić Z and Stančić G. 2008. Influence of ultrasonic transducer acoustic impedances and dimensions on its input electrical impedance. *Working and Living Environmental Protection* 5, 59-72.
- Mančić D and Stančić G. 2010. New three-dimensional matrix modes of the ultrasonic sandwich transducers. *J Sandwich Struc Mater* 12, 63-80.
- Radmanović M and Mančić D. 2004. Design and modeling of the power ultrasonic transducers. *MP Interconsulting, Le Locle, Switzerland*, 8-161.
- Rajapan D. 2002. Performance of a low-frequency, multi-resonant broadband tonpilz transducer. *J Acoust Soc Am* 111, 1692-1694.
- Saijyou K and Okuyama T. 2010. Design optimization of wide-band tonpilz piezoelectric transducer with a bending piezoelectric disk on the radiation surface. *J Acoust Soc Am* 127, 2836-2846.

- Saijyou K and Okuyama T. 2011. Estimation of frequency characteristics of the tonpilz piezoelectric transducer with a bending piezoelectric disk. *Applied Acoustics* 72, 915-922.
- Yao Q and Bjorno L. 1997. Broadband tonpilz underwater acoustic transducers based on multimode optimization. *IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Contr* 44, 1060-1066.

