

광대역 초음파 변환기를 위한 전기 임피던스 정합 연구

Study on Electrical Impedance Matching for Broadband Ultrasonic Transducer

김건우*, 김기복**†, 백광세***

Geonwoo Kim*, Ki-Bok Kim**† and Kwang Sae Baek***

초 록 초음파탐상법을 이용하여 마이크로미터의 크기 작은 결함을 검출하기 위해서는 높은 공진주파수와 큰 분해능의 초음파 변환기가 필요하다. 초음파 변환기의 공진주파수와 분해능은 변환기에 사용된 압전소자의 두께, 후면재 및 탐상 시스템 간의 전기 임피던스 정합과 밀접한 관련이 있으며, 이 중 전기 임피던스 매칭은 초음파 변환기와 초음파탐상 시스템 사이의 서로 다른 입-출력단을 연결하는 과정에서, 두 연결단의 전기적 임피던스 차이에 의한 에너지 반사와 손실을 줄이는 중요한 역할을 한다. 임피던스 정합에서 흔히 많이 사용하는 방법은 LC정합회로이다. 이러한 LC정합을 통해 탐상 시스템과 초음파 변환기의 전기 임피던스를 50 Ω으로 맞추어 두 연결단 사이의 임피던스 차이를 보정해 줌으로서 초음파 변환기에서 발생하는 전기신호의 손실을 줄 수 있다. 본 연구에서는 15 MHz의 공진주파수를 가지는 광대역 수침형 초음파 탐촉자를 제작하고 광대역 특성을 갖는 초음파 변환기를 위한 LC 임피던스 정합법을 적용하였다.

주요용어: 임피던스 정합, 초음파 변환기, 광대역, LC정합

Abstract Ultrasonic transducers with high resolution and resonant frequency are required to detect small defects (less than hundreds of μm) by ultrasonic testing. The resonance frequency and resolution of an ultrasonic transducer are closely related to the thickness of piezo-electric materials, backing materials, and the electric impedance matching technique. Among these factors, electrical impedance matching plays an important role because it can reduce the loss and reflection of ultrasonic energy differences in electrical impedance between an ultrasonic transducer and an ultrasonic defects detecting system. An LC matching circuit is the most frequently used electric matching method. It is necessary for the electrical impedance of an ultrasonic transducer to correspond to approximately 50 Ω to compensate the difference in electrical impedance between both connections. In this study, a 15 MHz immersion ultrasonic transducer was fabricated and an LC electrical impedance circuit was applied to that for having broad-band frequency characteristic.

Keywords: Ultrasonic Transducer, Impedance Matching, Ultrasonic Transducer, Broadband, LC Matching

1. 서 론

압전 초음파 변환기는 비파괴검사, 의료 및 다양한 산업 분야에서 널리 사용되고 있다[1,2]. 전통적인 초음파 변환기는 협대역 변환기의 설계 제작에 있어서 신호의 크기를 증가시키기 위한 노력이 경주되어 왔다. 시간이 지남에 따라 많은

분야에서 초음파 변환기에 대한 수요가 증가하였고 각 분야에서 요구되는 다양한 종류의 광대역 압전 초음파 변환기 설계에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다[3,4]. 초음파 신호를 발생시키기 위하여 가장 많이 사용되는 방법은 압전소자를 이용한 초음파 변환기이다. 일반적으로 초음파 변환기에 사용되는 압전소자는 자체의 공진주파

[Received: November 17, 2016, Revised: January 18, 2017, Accepted: January 25, 2017] *과학기술연합대학원대학교, **한국표준과학연구원, ***(주)엘라켄, † Corresponding Author: Korea Research Institute of Standards and Science, Center for Safety Measurement, 267 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Republic of Korea (E-mail: kimkibok@kriss.re.kr)
© 2017, Korean Society for Nondestructive Testing

수를 갖고 있기 때문에 높은 품질인자(quality factor)를 가진다. 이러한 압전소자에 전압이 인가 되면 긴 펄스 지속시간을 가지는 신호가 발생된다. 비파괴검사 분야에서 사용되는 초음파 변환기는 변환기에서 발생된 초음파가 결함 신호와 비결함 신호를 잘 구분할 수 있도록 감도가 크고 깊이 방향 분해능이 높은 광대역 특성이 요구되고 있다. 이러한 조건을 만족시키기 위해서는 결함 부위에서 반사된 초음파 신호가 가능한 짧은 펄스 지속시간을 갖도록 초음파 변환기를 설계해야 한다[5]. 짧은 펄스 지속시간을 갖기 위해서는 일반적으로 압전소자의 상단에 위치하여 기계적 완충 역할을 하는 후면재(backing)의 음향임피던스를 압전소자의 음향임피던스와 같게 하는 방법과 초음파 변환기와 초음파 시스템 간의 전기 임피던스 정합을 이용하는 방법을 함께 사용한다[6,7]. 이 중 전기 임피던스 정합은 주로 인덕터와 커패시터를 이용하여 초음파 변환기와 펄스/리시버의 두 연결단 사이에 정합회로를 삽입하여 두 연결단 사이의 임피던스 차이를 보정해 줌으로써 두 송·수신단 사이의 에너지 손실을 감소시키고 주파수 특성을 사용 목적에 따라 개선할 수 있다. 이러한 방법을 LC-정합이라고도 한다[7,8]. 이러한 이론적인 방법에도 불구하고 초음파 변환기를 제작하는데 있어서 구체적으로 적용되어 전기 임피던스 정합 전·후의 신호 개선 효과나 특성에 대한 비교 연구는 거의 없는 실정이다. 이에 본 연구는 압전소자와 후면재의 설계조건들을 고정한 다음 광대역 초음파 변환기의 제작에 필요한 전기 임피던스 정합 조건의 영향을 실험적으로 고찰하여 실제 변환기 설계·제작에 필요한 기술적인 정보를 제공하기 위하여 수행되었다.

2. 재료 및 방법

2.1. 초음파 변환기 제작

압전 초음파 변환기는 압전소자에서 발생된 초음파가 검사체를 투과하여 검사체 내부의 결함 및 바닥면을 반사 및 투과하며 돌아오는 초음파 신호를 송·수신하는 장치이다. 압전 초음파 변환기의 주요 설계인자는 공진주파수, 대역폭, 압전소자의 크기, 분해능, 근거리 음장, 음향 집속거리, 전면정합층, 전기정합회로, 후면재 등이 있다

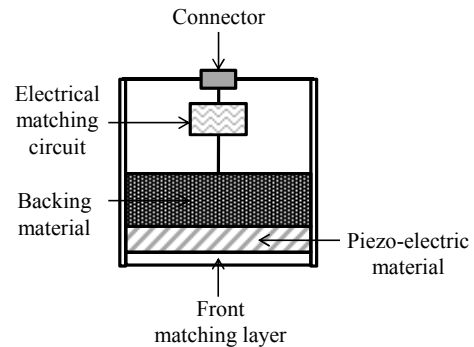


Fig. 1 Structure of piezo-electric ultrasonic transducer

[9,10]. Fig. 1은 초음파 변환기의 구조를 나타낸 것이다.

여러 설계 인자들 중 초음파 변환기의 대역폭에 가장 큰 영향을 주는 요소는 압전소자의 후방에 위치하여 소자 후면으로 전달되는 초음파 신호를 감쇠 및 산란시키기 위한 후면재(backing)이다[11].

후면재가 초음파 에너지를 감쇠 및 산란시키면 탐상체 내부에 입사되는 초음파 에너지는 짧은 펄스 지속시간을 갖게 되고, 이러한 특징은 큰 대역폭을 갖는 광대역 초음파 변환기의 필수적인 요건이다[6,7]. 본 연구에서 사용된 후면재는 금속 입자와 에폭시를 적절한 비율로 배합하여 최대한 압전소자의 음향임피던스(34 MRayL)에 근접하여 제작하도록 하였으며 최종적으로 약 10 MRayL의 음향임피던스를 갖도록 제작하였다.

전면정합층(front matching layer)은 압전소자에서 발생된 초음파 에너지를 시험체 내부에 입사할 때 시험체와 압전소자 사이의 음향임피던스를 보정하여 압전소자에서 발생시킨 초음파 에너지 손실을 최소화함과 동시에 압전소자를 외부 충격으로 보호하는 역할을 한다. 전면정합층의 설계는 압전소자의 음향임피던스(Z_1)와 탐상체의 음향임피던스(Z_3)를 고려하여 전면정합층의 음향임피던스(Z_2)와 두께(t)를 결정하는 것이며 다음과 같은 식으로 정의된다[12].

$$Z_2 = \sqrt{Z_1 \times Z_3} \quad (1)$$

$$t = \frac{\lambda}{4} \quad (2)$$

여기에서, λ 는 전면정합층에서 전달되는 초음파의 파장이다.

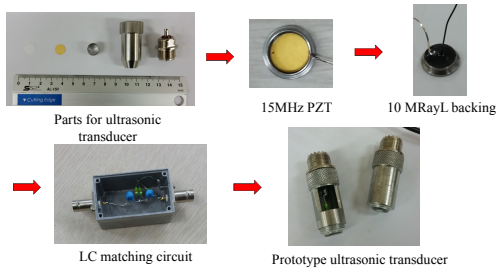


Fig. 2 Fabrication of 15 MHz immersion ultrasonic transducer

본 연구에 사용된 압전소자의 음향임피던스는 약 34 MRayL이며, 수침형 초음파 변환기를 고려할 경우 물의 음향임피던스는 약 1.5 MRayL이다. 따라서 이론적인 전면정합층의 음향임피던스 (Z_2)가 약 7.1 MRayL인 재료를 선택해야 하나, 정확하게 이러한 값을 가지면서 수침형 소재로 사용할 수 있는 재료를 구하는 것이 어렵기 때문에 비교적 가까운 범위의 음향임피던스 값 (3.5 MRayL)을 가지는 Plexiglass($C_5O_2H_8$)을 선택하였다. Plexiglass는 아크릴 계열의 고분자 재료로써 조직이 치밀하고 단단하기 때문에 초음파 감쇠가 매우 적어 사각탐상용 초음파 변환기의 켈기(wedge)에도 널리 사용되는 재료이다. 압전소자는 공진주파수 15 MHz, 지름 약 6.35 mm, 두께 약 0.1 mm를 갖는 Fujicermics社(Japan)의 M5 소자를 선택하였다. 초음파 변환기의 부속품은 압전소자를 전기적으로 절연시키는 내부 및 외부 케이스, 압전소자, 전면정합층, BNC 케이블, 후면재 등으로 구성된다. Fig. 2는 본 연구에서 제작된 15 MHz 수침형 초음파 변환기의 구성품들과 최종 제작된 시작품을 나타낸다. 최종 시작품에서 금속 케이스의 한 면을 절단하여 다양한 전기 임피던스 정합회로를 제작하여 결합할 수 있도록 하였다.

2.2. LC 임피던스 정합회로

임피던스 정합회로는 두 개의 다른 임피던스 단 사이에 위치하여 두 입·출력단 사이에서 에너지가 전송될 때 두 임피던스 차이에 의한 반사에 따른 에너지 손실을 줄이는 역할을 한다. 일반적으로 초음파 시스템을 포함한 대부분의 전기기기는 전자파 에너지의 전력 전송 특성이 가장 좋은

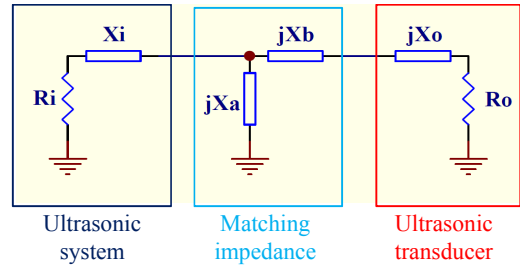


Fig. 3 Electrical impedance network for ultrasonic system, LC matching and ultrasonic transducer

임피던스인 33 Ω과 신호 파형의 왜곡이 가장 적은 임피던스인 75 Ω의 중간값인 50 Ω으로 설정되어 있다. 따라서 초음파 변환기의 전기 임피던스 정합은 $R_i = 50, X_i = 0$ 으로 맞추는 정합회로 조건을 목표로 하였다. Fig. 3은 초음파 시스템, 정합회로 단자, 초음파 변환기의 전기 임피던스 네트워크를 나타낸다[7].

초음파 시스템의 전기 임피던스(Z_i)는 다음과 같다.

$$Z_i = R_i + jX_i \tag{3}$$

여기서, $j = \sqrt{-1}$, R_i 는 초음파 시스템의 저항, X_i 는 초음파 시스템의 리액턴스를 나타낸다.

초음파 변환기의 전기 임피던스(Z_0)는 다음과 같다.

$$Z_0 = R_0 + jX_0 \tag{4}$$

여기서, R_0 는 초음파 변환기의 저항, X_0 는 초음파 변환기의 리액턴스를 나타낸다.

정합회로 단자의 리액턴스(X_a, X_b)는 다음과 같이 표시된다.

$$X_a = \frac{-(R_i^2 + X_i^2)}{QR_i + X_i} \tag{5}$$

$$X_b = QR_0 - X_0 \tag{6}$$

여기서, Q는 다음과 같이 정의된다[7].

$$Q = \pm \sqrt{\left[\frac{R_i \left\{ 1 + \left(\frac{X_i}{R_i} \right)^2 \right\}}{R_0} - 1 \right]} \tag{7}$$

정합회로단의 임피던스는 전압과 전류의 비로 이루어지고 식(8)의 복소 형태로 표현되며 저항인 R 은 실수부, 허수부는 인덕턴스(L , inductance)와 커패시턴스(C , capacitance)로 표현된다.

$$Z = R + jX = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \quad (\omega = 2\pi f) \quad (8)$$

인덕턴스(L)과 커패시턴스(C)는 각각 자기장 성분과 전기장 성분으로 에너지를 축적한다. 여기서 에너지가 축적된다는 의미는 도선을 따라 흐르던 임의의 주파수 성분의 전기 에너지가 선로를 통과하지 못하고 L , C 성분에 의해 주변 전자기장에 축적되는 것이다. 따라서 전송되는 임의의 주파수 성분의 전기 에너지가 최종적으로 도달되는 에너지와 다르게 되는 현상이며 전자기장에 축적된 에너지는 사라지는 것은 아니다. 결국 전달된 신호는 식(8)과 같이 주파수의 크기에 따라 인덕턴스와 커패시턴스 값에 의해 에너지 축적 정도가 바뀌고 신호의 특성(전기장, 자기장)에 따라 L 과 C 에는 에너지의 축적 및 방출이 반복된다. 즉, 에너지는 사라지는 것처럼 보이지만 분명히 존재하고 있는 허수 형태의 에너지라고 할 수 있다. 식(8)에서 실수부 R 은 주파수와 무관하게 항상 상존하는 소모 및 부하성 저항을 의미하기 때문에 LC 정합과 관련이 없으며 오직 허수 성분만 관련이 있다. 만약 실수부 R 을 50Ω 으로 만들기 위해 저항을 연결한다면 실제로 에너지를 소모시키는 잡음원이 될 수 있다[13,14].

LC 회로 정합을 위한 초음파 시스템 및 변환기의 전기 임피던스는 복소수의 형태로 표현되며, 이를 측정해야하기 때문에 보통 임피던스 분석기를 이용하여 초음파 시스템과 초음파 변환기 사이의 전기 임피던스를 측정한다. 식(5), (6), (7)을 통해 이론적인 정합 임피던스인 X_a , X_b 를 얻을 수 있다. 이후 초음파 변환기의 주파수 특성에 따라 적절한 필터의 형태 (저역 통과, 고역 통과, 대역 통과)를 선택한다. 즉, 압전소자의 공진주파수(f_r)를 기준으로 초음파 변환기의 대역폭이 결정되고 공진주파수(f_r)를 가장 잘 통과시키는 효과적인 필터를 구현하는 과정과 매우 유사하기 때문이다[7,8]. 따라서 저역통과필터(low pass filter, LPF), 고역통과필터(high pass filter,

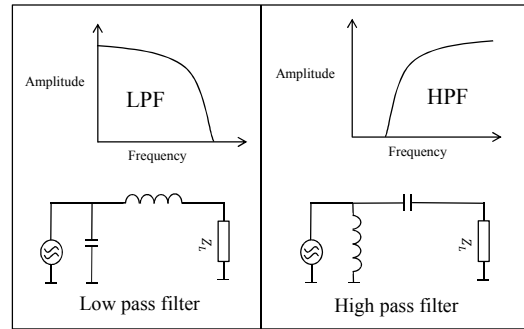


Fig. 4 Frequency characteristics of LPF and HPF and their circuit diagrams

HPF), 대역통과필터(band pass filter, BPF)는 압전소자의 주파수 특성과 사용 목적에 따라 불필요한 주파수 대역의 에너지를 전기정합 주파수 대역으로 집중시키는 역할을 한다. 특히 광대역 초음파 변환기의 경우 LPF와 HPF를 많이 이용하는데 이는 최대한 넓은 대역의 주파수 대역을 사용하기 위함이다. Fig. 4는 LPF와 HPF의 주파수 특성과 구성회로를 각각 나타낸다[14].

압전소자의 주파수 특성과 초음파 변환기의 사용 목적에 따라 적절한 필터의 형태를 결정한 후, 초음파 변환기의 임피던스(R_0 , X_0)를 식(5)와 (6)을 통해 얻은 이론적인 전기 정합 임피던스(X_a , X_b)로 바꾸기 위해 다음과 같은 식(9) ~ (12)를 이용하여 인덕턴스(L_a)와 커패시턴스(C_b) 값을 찾는다[13].

$$X_a > 0, L_a = \frac{X_a}{2\pi f} \quad (9)$$

$$X_a < 0, C_b = -\frac{1}{2\pi f X_a} \quad (10)$$

$$X_b > 0, L_a = \frac{X_b}{2\pi f} \quad (11)$$

$$X_b < 0, C_b = -\frac{1}{2\pi f X_b} \quad (12)$$

Smith 차트를 이용할 경우 초음파 변환기의 임피던스 ($Z_0 = R_0 + jX_0$)를 Smith 차트의 중간점인 $50+j0$ 를 목표로 필터의 형태를 결정하여 Smith 차트의 인덕턴스와 커패시턴스의 궤적을 따라 이동하여도 동일한 결과를 얻을 수 있다[14].

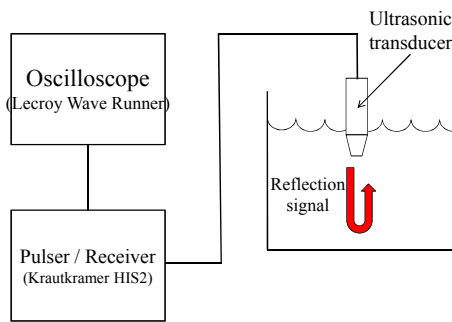


Fig. 5 Ultrasonic experimental setup for immersion type ultrasonic transducer

2.3. 실험 조건 및 방법

제작된 초음파 변환기와 임피던스 정합회로의 성능 평가를 위하여 Fig. 5와 같은 실험장치를 구성하였다. 실험 장치는 15 MHz 초음파 변환기, 임피던스 정합회로, 오실로스코프(Lecroy Co. Ltd., Wave Runner 640Zi, USA), 펄서/리시버(Krautkramer Co. Ltd., HIS2, Japan), 구성하였다. 펄서/리시버를 통해 초음파 변환기에 전압이 인가되면 초음파 변환기에서 발생한 초음파가 수조의 바닥면을 맞고 돌아오는 반사 신호를 획득하여 반사 신호의 크기와 주파수 대역을 분석하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 전기 임피던스 정합되지 않은 초음파 변환기의 반사 신호

먼저 전기적 정합회로 없이 제작된 초음파 변환기는 공진주파수는 15 MHz이며 Fig. 5의 실험 장치를 이용하여 수조 바닥에서 반사된 초음파 변환기의 반사 신호와 주파수 분석 결과는 Fig. 6에서 보는바와 같다. 전기정합회로가 없는 초음파 변환기의 반사 신호의 최대 수신 전압은 약 1.9 V, 대역폭은 약 65%, 중심주파수는 약 14.8 MHz로 나타났다. 제작된 초음파 탐촉자의 후면재는 약 10 MRayL의 음향임피던스이며 사용된 PZT의 음향임피던스인 약 34 MRayL보다 작기 때문에 압전소자 후면으로 전파되는 초음파 에너지를 효과적으로 감쇄 및 산란을 시키기 어려워 광대역 특성을 나타내지 못하였다.

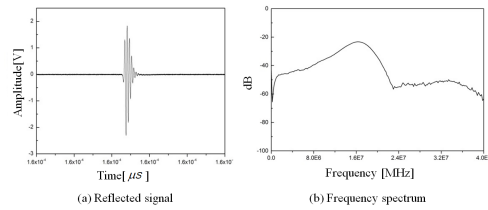


Fig. 6 Ultrasonic echo signal (a) and its frequency spectrum of 15 MHz ultrasonic transducer without electrical matching circuit

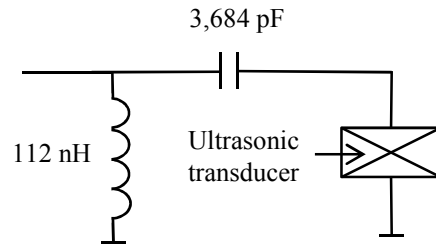


Fig. 7 HPF type LC circuit for 15 MHz-broadband ultrasonic transducer

3.2. LC 임피던스 정합회로 제작

Fig. 6 (b)의 주파수 분석 결과 전기정합회로가 없는 초음파 변환기의 중심주파수는 약 14.8 MHz이며, 가용 주파수는 약 ~ 23 MHz로서 광대역 특성을 가지기 위해서는 상대적으로 높은 주파수 쪽으로 대역폭을 확장해야 할 필요성이 있다. 따라서 고주파 영역의 신호를 위한 HPF 형태의 매칭 필터를 설계하였다. HPF 필터의 인덕턴스와 커패시턴스를 결정하기 위해 초음파 변환기의 전기 임피던스($R_0 = 2.14, X_0 = 13$)을 회로망 분석기(E4991A, Agilent Co., Ltd, USA)를 이용하여 분석하였다. 회로망 분석기로 측정된 전기 임피던스 값들과 식(7)을 이용하여 Q 값을 계산한 결과 $Q = \pm 4.72$ 로 나타났다. 이 값을 토대로 고역통과 필터(HPF)의 조건인 $Q > 0$ 조건에서 X_a, X_b 의 부호는 식(5)와 (6)에 의해 각각 $X_a = 10.57 > 0, X_b = -2.88 < 0$ 이 되며, 커패시턴스(L_a)와 인덕턴스(C_b)의 값은 각각 식(9)와 (12)에 의해 $L_a = 112nH, C_b = 3,684pF$ 로 계산된다. 최종적으로 이들 값들을 이용하여 설계된 HPF 형태의 전기 정합회로를 Fig. 7과 같이 제작하였으며 Fig. 2의 변환기 시작품에 연결하였다.

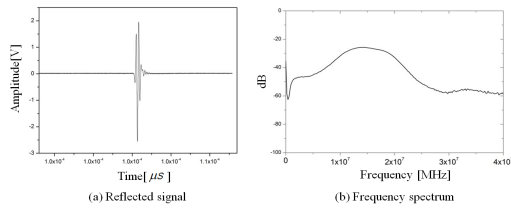


Fig. 8 Ultrasonic echo signal (a) and its frequency spectrum of 15 MHz-ultrasonic transducer with electrical matching circuit

3.3. 전기 임피던스 정합된 초음파 변환기의 반사 신호

제작된 15 MHz 초음파 변환기와 LC 정합회로 단자를 연결하여 전기 임피던스 매칭이 되지 않은 초음파 변환기와 같은 실험 조건으로 성능평가를 수행하였다. LC회로가 정합된 변환기의 반사 신호와 주파수 분석 결과는 Fig. 8과 같다. LC 정합회로를 가지는 초음파 변환기의 최대 진폭은 2 V, 중심주파수 약 15 MHz, 대역폭은 약 95%로 나타났다. 최대 수신 전압은 전기 정합을 하지 않은 초음파 변환기에 비하여 약 0.1 V정도 증가하였고 대역폭의 경우 약 30%정도의 주파수 특성이 개선되었다.

4. 결론

광대역 초음파 변환기의 주요 설계인자들은 후면재, 전면정합층, 전기 임피던스 정합, 압전소자 종류 등과 같은 여러 가지 요소가 있으나 본 연구에서는 전기 임피던스 정합에 주안점을 두고 광대역 초음파 변환기를 설계·제작하여 전기 임피던스 정합 전후의 신호 특성을 비교 분석하였다.

후면재의 음향임피던스를 10 MRayL로 고정하고 LC 임피던스 정합을 통하여 광대역 특성 (대역폭 90% 이상)을 갖도록 설계하였다. LC 임피던스 정합은 입력 전기 임피던스($R_i = 50, X_i = 0$)와 부하 임피던스(초음파 변환기의 임피던스)가 일치하도록 하였다. 서로 다른 두 전기 임피던스 사이에서 정합 임피던스 회로를 삽입하여 임피던스 차이에 의한 반사에 따른 에너지 손실을 줄여 주는 역할을 하여 원하는 주파수 영역의 에너지를 끌어 올리거나 제거하는 역할을 한다. 본 연

구에서 제작된 LC 정합회로가 적용된 초음파 변환기의 중심주파수는 약 15 MHz로서 성능 평가를 위해 동일한 실험 조건에서 LC 정합회로 유무에 따라 초음파 변환기의 성능을 비교하였다. 최대 수신 진폭은 약 5%, 주파수 대역폭은 약 30% 증가하여 이러한 결과는 광대역 초음파 변환기의 설계·제작 기법 향상에 도움이 될 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 2016년도 중소기업융복합기술개발(s2356983)에 의한 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- [1] A. Manbachi and R. S. C. Cobbold, "Development and application of piezoelectric materials for ultrasound generation and detection," *Ultrasound*, Vol. 19, No. 4, pp. 187-196 (2011)
- [2] A. L. Bernassau, T. Button, K. Choi, S. Cochran, C. Demore, L. G. Gancedo, D. Hutson, T. Jackson, H. Kim, I. Kim, C. Meggs, S. T. McKinstry and R. Tutwiler, "Operation of a high frequency piezoelectric ultrasound array with an application specific integrated circuit," *In Proceedings of the 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, pp. 1-4 (2009)
- [3] H. J. Dong, J. Wu, H. Zhang and G. Y. Zhang, "Design and development of a multi-hole broadband-based ultrasonic transducer," *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 18, No. 2, pp. 562-566 (2011)
- [4] Y. Pan, X. Mo, Y. Chai, Y. Liu and Z. Cui, "A new design on broadband flexensional transducer," *Applied Acoustics*, Vol. 72, No. 11, pp. 836-840 (2011)
- [5] J. Assaad, M. Ravez, C. Bruneel, J. M. Rouvaen and F. Haine, "Influence of the thickness and the attenuation coefficient of a backing on the response of transducers," *Ultrasonics*, Vol. 34, No. 2-5, pp. 103-106 (1996)

- [6] G. C. Low and R. V. Jones, "Design and construction of short pulse ultrasonic probes for non-destructive testing," *Ultrasonics*, Vol. 22, No. 2, pp. 85-96 (1984)
- [7] G. Petersen, "L-Matching the Output of a RITEC Gated Amplifier to an Arbitrary Load," www.ritecinc.com/pdfs/match3.pdf
- [8] J. An, K. Song, S. Zhang, J. Yang and P. Cao, "Design of a broadband electrical impedance matching network for piezoelectric ultrasound transducers based on a genetic algorithm," *Sensors*, Vol. 14, No. 4, pp. 6828-6843 (2014)
- [9] G. Kossoff, "The effects of backing and matching on the performance of piezoelectric ceramic transducers," *IEEE Trans. on Sonic and Ultrasonics*, Vol. 13, No. 1, pp. 20-30 (1966)
- [10] C. S. Desilets, J. D. Fraser and G. S. Kino, "The design of efficient broad-band piezoelectric transducers," *IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics*, Vol. 25, No. 3, pp. 115-125 (1978)
- [11] M. G. Crewe, T. R. Gururaja, T. R. Shrout and R. E. Newnham, "Acoustic properties of particle/polymer composites for ultrasonic transducer backing applications," *IEEE Trans. on Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 37, No. 6, pp. 506-513 (1990)
- [12] K.-B. Kim, D. K. Hsu, B. Ahn, Y.-G. Kim and D. J. Banard, "Fabrication and comparison of PMN-PT single crystal, PZT and PZT-based 1-3 composite ultrasonic transducers for NDE applications," *Ultrasonics*, Vol. 50, No. 6, pp. 790-797 (2010)
- [13] P. Horowitz and Winfield Hill, "The Art of Electronics," 2nd Edition, Cambridge University Press, The Pitt Building, Trumpington Street, Cambridge CB2 1RP, pp. 29-44 (1990)
- [14] RFDH, "RF Database," <http://www.rfdh.com/> (Accessed 23 Sep. 2016)
- [15] NDT Encyclopedia, "Bandwidth," <http://www.ndt.net/ndtaz/content.php?id=53> (Accessed 23 Sep. 2016)
- [16] K.-B. Kim, B. Y. Ahn, Y.-G. Kim, S.-K. Park and J.-S. Ha, "Study on ultrasonic transducer for non-destructive evaluation of highly attenuative material using PMN-PT single crystal," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 27, No. 4, pp. 313-320 (2007)