

초음파 변환기의 감도 교정 시스템 구성

Design of the Calibration System for Determining the Sensitivity of Ultrasonic Transducer

사공 성 대, 조 문 재, 최 봉 열
(Seong Dae Sagong, Moon Jae Jho, and Bong Yeol Choi)

Abstract : In this paper, a precise sensitivity measurement system of ultrasonic transducer in the frequency range from 1 MHz to 15 MHz, which can implement the reciprocity principle is constructed. All of the elements of this system such as the ultrasonic preamplifier, ultrasonic absorber, water tank, water degassing system, and four-axes translator and reflector are constructed. For the performance evaluation of the calibration system, a standard hydrophone precisely calibrated from PTB(Physikalisch Technische Bundesanstalt) in Germany are used. And the system parameters which affected the evaluation of the measurement accuracy and the reproducibility in various measuring conditions are considered. The measurement uncertainty of the calibration system is estimated within $\pm 2.0\text{dB}$.

Keywords : ultrasonic transducer, reciprocity principle, calibration system, measurement accuracy, reproducibility

I. 서론

초음파가 산업용, 군사용, 의료용 등 다방면에 걸쳐 사용됨에 따라 초음파 장비의 전기 음향학적 특성을 파악하는 것은 사용자나 환자뿐만 아니라 초음파 장비를 생산하는 제조업체의 최대 관심사로 대두되었다.

초음파 음장의 물리적 특성을 정밀하게 측정하기 위해서는 사용되는 초음파 변환기 또는 하이드로폰의 감도(sensitivity), 즉 입력되는 음압과 이때 변환기에서 발생하는 전압의 비를 정확히 알아야 한다. 초음파 변환기의 교정(calibration)이란 감도를 결정하는 것을 말한다.

초음파 변환기의 감도를 정확히 결정하기 위해서는 변환기의 진동판에 가해지는 음압과 이때 출력되는 전압을 정밀하게 측정하여야 한다. 그러나 일반적으로 변환기에서 발생하는 전기적 신호는 정확하게 측정할 수 있으나 변환기에 가해지는 음압을 정확하게 결정하기는 쉽지 않다. 이와 같은 이유로 초음파 변환기의 감도를 정밀하게 결정하기 위해서는 음압의 절대값을 측정하지 않고도 전기적인 양을 정밀하게 측정할 수 있는 가역교정 방법(reciprocity calibration technique)을 이용한다[1]. 이 방법은 전기회로에서 사용되는 가역원리를 이용하여 하이드로폰의 개방회로 전압과 송신용 변환기에 인가되는 입력전류 등을 측정하여 감도를 결정하는 방법으로 교정 정밀도가 높고 시스템 구성이 비교적 간단하기 때문에 초음파 변환기의 감도 교정으로 국제적으로 통용되고 있는 방법이다[2].

본 논문에서는 IEC(International Electrotechnical Commission)에서 권장하고 있는 1MHz에서 15MHz 주파수 범위에서의 교정대상 변환기의 감도를 결정할 수

있는 두 개의 초음파 변환기를 이용한 가역교정의 원리와 방법을 기본으로 하여 구성된 교정 시스템 및 교정 결과에 대해 기술하기로 한다.

II. 전기음향 가역원리

만약 선형적이고 수동소자(passive element)로 구성된 전기회로에서 일정한 임피던스를 갖고 있는 전원으로 부터 발생한 전압 E_1 이 회로의 다른 부위에 동일한 임피던스를 갖고 있는 전류계에 전류 I_1 을 발생시켰다고 할 경우 이들의 위치를 바꾸어 놓더라도 전류계에는 동일한 전류 I_1 이 흐르게 된다.

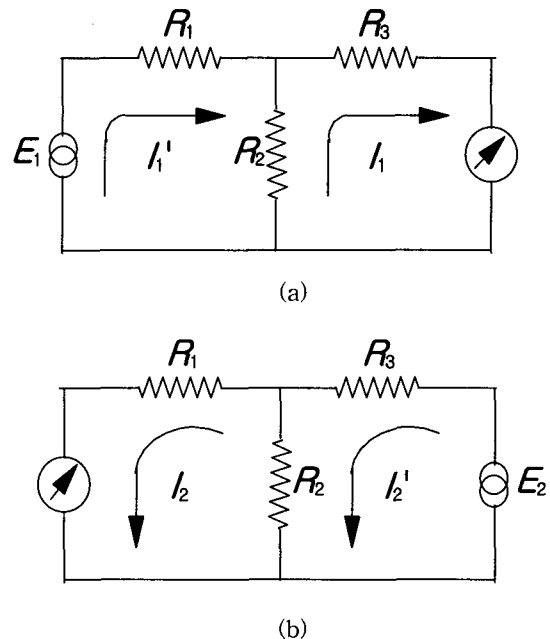


그림 1. 가역원리 설명을 위한 선형 전기회로.
Fig. 1. Linear electric-circuit for describing reciprocity principle.

접수일자 : 1998. 6. 19. 수정완료 : 1998. 12. 23.

사공성대 : 영동대학교 전자공학부

조문재 : 한국표준과학연구원 역학연구부

최봉열 : 경북대학교 전자전기공학부

그림 1(a)에 주어진 4단자 회로에서 이 회로의 지로 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$(R_1 + R_2) I_1' - R_2 I_1 = E_1 \quad (1)$$

$$R_2 I_1' - (R_2 + R_3) I_1 = 0$$

이 식을 전류 I_1 에 대해서 풀면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$I_1 = \frac{E_1 R_2}{\begin{vmatrix} (R_1 + R_2) & -R_2 \\ -R_2 & (R_1 + R_3) \end{vmatrix}} = E_1 Z \quad (2)$$

한편 그림 1(b)에서와 같이 전원과 전류계의 위치를 바꾸어 놓을 경우 동일한 방법으로 전류 I_2 를 구하면 다음 식과 같이 주어진다.

$$I_2 = \frac{E_2 R_2}{\begin{vmatrix} (R_1 + R_2) & -R_2 \\ -R_2 & (R_1 + R_3) \end{vmatrix}} = E_2 Z' \quad (3)$$

(2)와 (3)의 행렬은 분모에 있는 행렬식에서 행과 열의 우수 번 교환으로 동일하게 만들 수 있기 때문에 결국 $Z=Z'$ 즉 $I_1=I_2$ 가 되며, 이와 같은 조건을 만족시키는 회로를 가역회로라고 한다. 선형적이고 수동소자로 이루어진 회로망은 아무리 복잡하더라도 이 조건을 만족시킨다.

가역원리는 전기회로뿐만 아니라 대부분의 수동적인 전기역학(electro-mechanical) 또는 전기음향 변환기에도 적용된다. 이것은 이들 변환기에 관한 전기역학 상수가 4단자망의 임피던스 소자로 나타내어질 수 있기 때문이다. 이러한 회로에서 임피던스 행렬식은 항상 대칭적이다. 그러나 가역관계에서 이들이 항상 동일한 부호를 가져야 할 필요는 없다. 즉 $Z = \pm Z'$ 을 만족시키면 가역적이라고 한다. 이와 같이 수동적인 전기역학 또는 전기음향 변환기에 적용되는 가역원리를 전기음향 가역원리(electro-acoustical reciprocity principle)라 한다. 전기음향 가역원리를 다시 표현하면 다음과 같다. "전기음향 변환기를 수신용으로 사용할 때 변환기 출력단자의 개방 회로 전압과 변환기에 인접한 임의의 기준점에서의 자유 음장 음압의 비를 변환기를 음원으로 사용할 때 기준점에서 일정한 거리 d 만큼 떨어진 위치에서의 음압과 변환기 입력단자에 흐르는 전류의 비로 나누어준 값은 상수가 된다." 이 상수를 가역상수(reciprocity constant)라 한다. 가역상수 값은 $2d \lambda / \rho c$ 로 주어지며, 초음파인 경우에는 $2A_p / \rho c$ 가 된다[3]. 여기서, λ 는 전달되는 음파의 파장, ρc 는 매질의 특성 임피던스, A_p 는 진행하는 초음파 빔의 단면적을 나타낸다. 그러나 선형적이고 수동소자로 이루어진 모든 변환기가 가역원리를 만족시키는 것은 아니다. 가역원리를 만족시키는 변환기를 가역 변환기(reciprocal transducer)라고 한다.

일반적으로 초음파 변환기와 같은 가역 변환기는 그림 2와 같이 두개의 단자 즉 전기단자와 음향단자로 구성된 등가회로로 표시할 수 있다.



그림 2. 변환기의 전기음향 등가회로.

Fig. 2. A transducer treated as an electro-acoustic two port network.

상기와 같은 회로의 방정식은 다음 식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} z_{11}i + z_{12}q_d &= U \\ z_{21}i + z_{22}q_d &= p_d \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, i 는 변환기의 전기단자에 흐르는 전류, q_d 는 진동판의 체적속도, U 는 전기단자에서 전압, p_d 는 진동판에 균일하게 가해지는 음압이다. 또한 z_{11} 은 진동판을 막았을 때의 변환기의 전기 임피던스이며, z_{22} 는 전기단자에 부하를 걸지 않았을 때 변환기의 음향 임피던스를 나타낸다. z_{12} 와 z_{21} 은 변환상수(transduction constant)로서, $z_{12} = \pm z_{21}$ 의 관계를 만족시키면 이 변환기를 가역적이라고 한다.

초음파 계측에 흔히 사용되는 초음파 변환기의 방정식은 다음과 같이 주어진다[4].

$$z_e i + M z_a q_d = U \quad (5)$$

$$M z_a i + z_a q_d = p_d$$

여기서, z_e 는 z_{11} , z_a 는 z_{22} 이며, M 은 초음파 변환기의 감도를 나타낸다. (5)에서 보듯이 초음파 변환기는 가역조건을 만족시키는 것을 알 수 있다.

III. 초음파 변환기의 가역교정 방법

초음파 변환기는 음향 에너지를 전기 에너지 또는 역 변환시키는 장치로서, 변환기가 수신용으로 사용될 때 수신 감도 M 은 변환기의 진동막에 균일하게 가해진 음압 p 에 대한 출력단자의 개방회로 전압 e 의 비로서 정의된다.

$$M = \frac{e}{p} \quad (6)$$

일반적으로 수신 감도는 음향의 기본단위인 dB(decibel)로 나타내며, 다음 식과 같이 정의된다.

$$R = 20 \log \left(\frac{M}{M_r} \right) \quad (7)$$

여기서 M_r 은 기준값을 나타내며, 일반적으로 1 volt/pascal를 사용한다.

초음파 변환기의 감도 측정 방법에는 방사압력 측정에 의해 결정된 송신용 초음파 변환기의 음향파워를 이용하는 planar scanning 방법[5]과 하이드로폰 진동막에 가해지는 초음파 세기에 비례하는 진동막의 진동변위를 레이저 간섭계로 측정하여 감도를 결정하는 방법[6] 및 가역원리에 의한 방법 등이 있다. Planar scanning 방법은 측정 정밀도가 다른 방법에 비해 떨어질 뿐만 아니라 측정에 걸리는 시간이 길다는 단점이 있다. 레이저 간섭

계 방법은 측정 불확도가 가역교정 방법과 비슷한 수준인 $\pm 1.5\text{dB}$ 정도로 매우 높은 반면 시스템의 구성이 매우 복잡하고 탐침형(probe) 하이드로폰의 교정에는 적용할 수 없다는 단점이 있다. 가역교정 방법에는 세 개의 변환기를 교대로 쌍을 이루어 하나는 발신, 다른 하나는 수신을 하게 하여 이때 입력 및 출력되는 전기적인 양을 측정하여 감도를 결정하는 방법[7]과 본 논문에서 제시하는 두 개의 변환기를 이용하는 방법이 있다. 세 개의 변환기를 이용한 가역교정 방법은 변환기를 음향중심에 정확히 위치시키는 것이 어렵기 때문에 0.5MHz 이하 영역에서의 감도 교정에 주로 사용된다. 따라서 1MHz 이상의 초음파 영역의 감도를 교정하기 위해 두개의 변환기를 이용한 가역교정 방법이 1976년 독일 연방물리기술청의 Brendel에 의해 개발되었다[8].

두 개의 변환기를 이용한 감도교정 방법의 원리는 그림 3과 같다. 감도교정을 위한 첫 번째 절차는 그림 3(a)에 나타난 바와 같이 입사된 초음파를 거의 반사시킬 수 있는 반사판을 사용하여 왼쪽에 위치되어 있는 초음파 변환기를 자체 가역교정(self reciprocity calibration)하는 것이다. 이때 반사판은 그림 3(b)에 나타난 바와 같이 가상 음원으로 생각할 수 있다. 송신용 변환기에 인가되는 전류 I_1 에 비례하는 초음파는 변환기로부터 반사판을 향하여 방사되고, 초음파 진행방향에 대해 수직하게 놓여 있는 반사판(A 위치)에 의해 반사된 파는 변환기로 되돌아와서 변환기의 개방회로 전압 U_1 을 야기시킨다. 초음파 변환기의 감도는 앞서 기술한 가역상수 J_p 와 개방회로 전압 U_1 및 송신용 변환기에 가해지는 구동전류 I_1 의 함수로 주어진다[9].

$$M_1 = \left(\frac{U_1 J_p}{I_1} \right)^{1/2} \quad (8)$$

이때 송신용 변환기에 가해진 전류에 대한 변환기로부터 방사된 초음파에 의해 야기된 음장의 음압(sound pressure) p 의 비로 주어지는 송신기의 전달응답 S_1 은 다음과 같다.

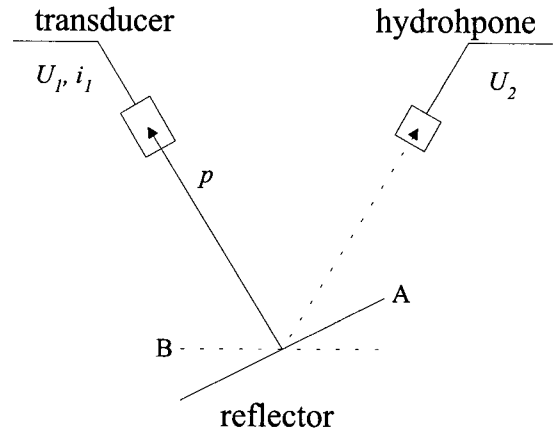
$$S_1 = \frac{M_1}{J_p} = \left(\frac{U_1}{I_1 J_p} \right)^{1/2} \quad (9)$$

$$p = S_1 I_1 = I_1 \left(\frac{U_1}{I_1 J_p} \right)^{1/2}$$

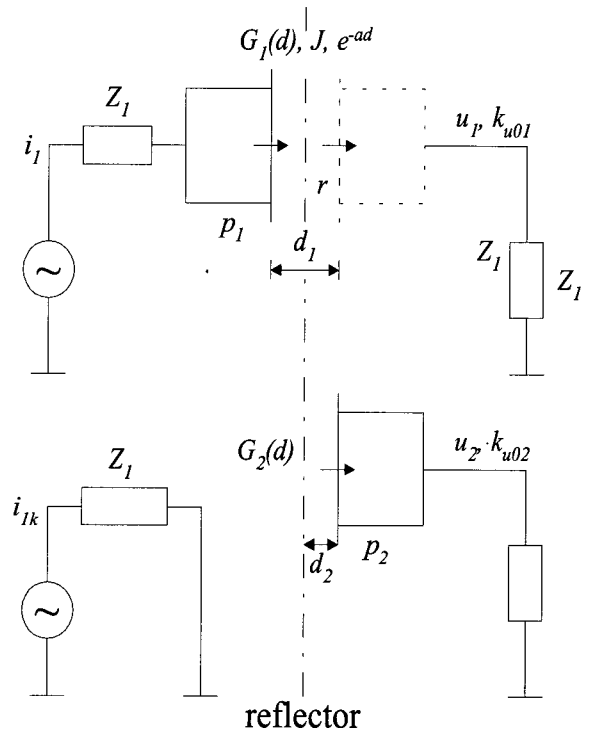
두 번째 단계로서 반사판을 B 상태로 이동시킨 후 교정대상 하이드로폰을 초음파 음장에 위치시켜 하이드로폰의 개방회로 전압 U_2 를 측정한다. 하이드로폰의 감도 M_2 는 (8)에서 구한 송신기의 전달응답과 초음파 방사에 의해 야기된 음압 및 하이드로폰의 개방회로 전압으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_2 = \frac{U_2}{p} = \frac{U_2}{I_1} \cdot \sqrt{\frac{I_1}{U_1} \cdot J_p} \quad (10)$$

(10)은 이상적인 경우를 나타내며, 실질적으로 하이드로폰의 감도를 결정하기 위해서는 이 식에 거리에 따른 흡음감쇠, 매질 내에서의 회절손실, 반사판의 반사율 및



(a) Principle of arrangement



(b) Equivalent circuit diagram

그림 3. 두 개의 변환기를 이용한 가역교정 방법.
Fig. 3. Two transducer reciprocity method.

개방회로 전압(open-circuit voltage) 보정 등이 고려되어야 한다.

보정량이 고려된 감도를 일반적으로 자유음장 개방회로(free-field open-circuit) 감도라 하며, 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$M_0 = M_2 \kappa \quad (11)$$

여기서, 보정 인자 κ 는 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$\kappa = \frac{\sqrt{k_{u01}}}{k_{u02}} \cdot \frac{\sqrt{r_1}}{r_2} \cdot \frac{\sqrt{G_1}}{G_2} \cdot e^{-ad_2} \quad (12)$$

여기서, k_{u01} 과 k_{u02} 는 송신용 변환기와 하이드로폰의 개방회로 보정치를 나타낸다. 변환기는 임피던스 정합을 위해 전치 증폭기에 연결하여 사용하기 때문에 변환기의 개방회로 전압을 직접 측정하기는 매우 어렵다. 따라서 개방회로 전압은 변환기의 출력신호를 측정한 후에 보정하여 결정한다. k_{u01} 은 송신용 변환기의 입력단자에서 단락회로 전류 I_{1k} , k_{u02} 는 하이드로폰 자체의 커패시턴스 C_1 과 신호선 및 전치증폭기로 인해 야기되는 순수한 커패시턴스 C_2 에 의해 결정된다. 이들 개방회로 보정치는 다음 식으로 주어진다[10].

$$k_{u01} = I_1 / I_{1k} \tag{13}$$

$$k_{u02} = C_1 / (C_1 + C_2)$$

(12)의 r_1 과 r_2 는 반사판이 A 혹은 B 위치에 있을 때의 음압 반사계수, d_2 는 반사판과 하이드로폰 사이의 거리, G_1 과 G_2 는 송신용 변환기와 하이드로폰의 구경과 따른 회절손실[11]을 나타낸다. α 는 매질내에서 진행되는 초음파의 거리에 따른 감쇠계수를 나타내며, 온도의 함수로 주어진다. 이는 23°C 순수한 물에서 약 2.3×10^{-4} ($\text{MHz}^{-2} \text{cm}^{-1}$) 정도이다[12].

IV. 감도교정 시스템의 구성

앞장에서 기술한 두 개의 변환기를 이용한 가역교정 원리를 바탕으로 송신용 변환기에서 초음파를 발생시킨 후 이때 변환기에 가해진 입력전류와 반사판에 의해 되돌아온 음향신호에 의해 야기된 변환기의 개방회로 전압을 측정하여 송신용 변환기를 자체 교정하고, 이로부터 교정대상 변환기(하이드로폰, 탐침 변환기 등)의 감도를 측정할 수 있는 시스템을 구성하였다.

초음파 변환기의 감도교정 시스템의 구성도는 그림 4와 같다. 그림에 나타난 바와 같이 송신용 변환기, 교정대상 변환기 및 하이드로폰 등은 4축 이송장치에 부착하여 위치를 정밀 조정하도록 설계하였다. 감도교정 시스템은 크게 초음파 변환기에 펄스신호를 가해주는 구동부와 변환기로부터 방사된 초음파에 의해 야기된 교정대상 변환기의 개방회로 전압을 측정할 수 있는 계측부로 구성되어 있다. 구동부는 신호 발생기로부터 나온 전기신호의 주파수를 측정하기 위한 주파수 계수기와 송신용 변환기에 인가되는 전류를 측정하기 위한 전류 탐침자(current probe), 전류 증폭기 및 오실로스코프 등으로 이루어진다. 변환기 및 하이드로폰의 개방회로 전압을 측정하기 위한 계측부는 임피던스 정합회로를 지닌 전치 증폭기, 주파수 분석기 및 주변기기들로 이루어진다.

주파수 발생기에서 게이트 증폭기(gated amp.)로 들어간 정현 신호는 톤버스트(tone burst) 신호로 변환되어 초음파 변환기에 인가되며, 변환기는 수조 내에서 반사판(A 위치)을 향하여 초음파를 방사한다. 본 논문에서는 송신용 변환기로 시간과 온도 변화에 대해 안정도가 좋고 변환기에 가해지는 입력전압에 대해 출력되는 음압의 비가 일정한 Panametric 사의 V304(공칭주파수: 2.25 MHz, 직경: 1인치)와 V311(공칭주파수: 10 MHz, 직경:

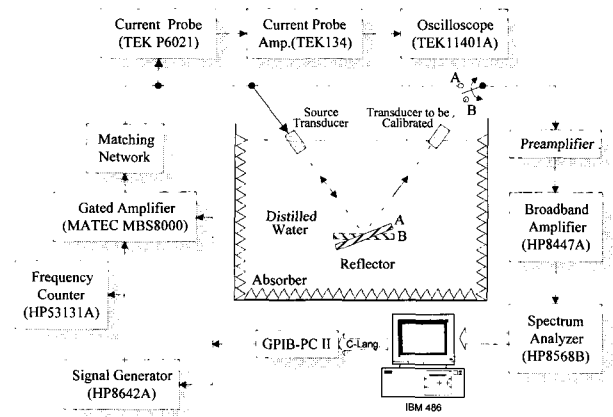


그림 4. 가역교정 시스템의 구성도.
Fig. 4. Experimental setup of reciprocity calibration system.

0.5인치)를 사용하였다. 변환기에서 방사된 빔은 반사판에서 거의 완전 반사하여 변환기로 되돌아와 변환기의 진동판을 가진시켜 전압을 발생시키게 된다. 이때 발생하는 전압은 변환기가 음원중심에 위치될 때 가장 커지며, 이를 위해 변환기와 반사판은 4축 이송장치와 4링크(link) 시스템에 의해 정밀 조정된다.

그림 4에 나타난 바와 같이 변환기에 가해지는 입력 전류는 전류 탐침자와 오실로스코프에 의해 측정되며, 반사판에 의해 되돌아온 에코신호에 의해 야기된 변환기의 출력전압은 임피던스 정합회로가 내장된 전치 증폭기, 광대역 수신기 등을 거쳐 스펙트럼 분석기에 의해 측정된다. 이와같이 측정된 전류와 전압값으로부터 송신용 변환기를 자체 교정한다. 두번째 단계로서 반사판을 B위치로 회전시켜 교정대상 변환기를 초음파 음장에 위치시킨 후 상기와 같은 방법으로 교정대상 변환기의 출력전압을 측정한다. 이상과 같은 과정을 통해 측정된 전류와 전압값을 (11)에 대입하여 감도를 결정한다.

감도 교정시 측정 정밀도를 향상시키기 위해서는 벽면 또는 측정장치로부터 반사된 파가 실제 음장에 미치는 영향을 가급적 줄여야 한다. 따라서 그림 4에 나타난 바와 같이 흡음재를 수조 벽면이나 바닥 등에 설치하여야 하는데, 측정에 사용되는 흡음재의 필수 조건은 음장에 노출된 표면에서 초음파가 반사되지 않고 흡음재 내부로 초음파가 통과되어야 하며, 통과된 초음파는 내부에서 열 에너지로 완전히 변환되어야 한다. 본 교정 시스템에 사용된 흡음재의 구조는 그림 5와 같다. 그림에 나타난 바와 같이 표면에서의 음향반사를 최대한 줄이고, 흡음율을 높이기 위해 초음파 음장에 노출되는 부분을 쉘기형으로 설계하였다. 또한 흡음재 내부에서의 흡음특성을 향상시키기 위해 약 0.1mm의 직경을 가지 유리가루를 그림에 나타난 바와 같은 비율로 배합하였으며, 고무의 재질은 물과 고유음향 임피던스가 거의 비슷한 합성고무(ethylen-propylen-terpolymer)를 사용하였다. 고무와 유리가루를 배합하면 이들 사이의 경계에 기공이 생기게 되며, 초음파가 이 사이를 지나갈 때 기

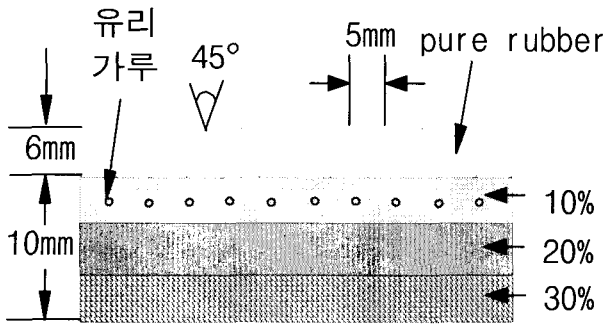


그림 5. 초음파용 흡음재의 구조도.
Fig. 5. Wedge type ultrasonic absorber.

공 내에 있는 공기와의 마찰로 인해 열에너지로 변환되기 때문에 흡음특성은 향상된다. 흡음재는 썩기 사이의 거리가 5mm, 각도가 45°이며, 순수한 고무로 되어 있는 썩기의 길이는 6mm이다.

가역교정을 하기 위해서는 앞서 논술한 바와 같이 자체 교정용 변환기와 교정대상 변환기를 반사판에 의해 형성된 초음파 음장의 음향중심에 정확히 맞추어야 한다. 따라서 변환기와 반사판의 위치 정렬은 교정 정밀도를 좌우하는 하나의 중요한 요소로서 작용한다. 본 논문에서 구성한 이송장치는 사다리꼴 나사 축과 선형 베어링 및 스테핑 모터로 구성된다. 이와 같은 구조로 결합된 이송장치의 최대 이송거리는 x축 600mm, y축 400mm, z축으로 400mm이다. 이 장치는 스테핑 모터에 의해 자동으로 구동되도록 설계되어 있다. 사다리꼴 나사 축이 일회전할 때 이동되는 거리는 5mm이고 스테핑 모터의 한 스텝당 회전각이 0.72°이므로 이송장치의 분해능은 약 10μm로 주어진다.

측정용 수조는 약 96,000cm³ (60×40×40cm : LWH)의 체적을 갖는 직육면체 형으로 두께 10mm 유리판과 스테인레스 스틸 기억자 앵글을 사용하여 제작하였다. 수조 윗부분은 이송장치를 설치하기 위해 폭 50mm로 설계하였다. 또한 수조의 한쪽 면은 변환기를 장착시킬 수 있도록 5mm 두께의 스테인레스 철판을 사용하였으며, 프레임에 나사로 결합되기 때문에 변환기 종류나 크기에 따라 교체가 용이하다.

가역교정에 사용되는 반사판은 앞서 기술한 바와 같이 초음파를 완전히 반사시킬 수 있도록 설계되어야 하며, 반사판의 반사특성은 교정 정밀도를 좌우하는 한가지 요소로서 작용한다. 반사판에서 투과나 흡수에 기인한 음압 손실이 생긴다면 측정 후에 보정하여 주어야 한다. 반사판은 음압 손실을 최소화하기 위해 압축율이 가급적 작아야 한다. 따라서 내부에 공기가 들어 있고 얇은 금속판으로 되어 있는 반사판은 큰 음압 손실을 유발시킬 수 있다. 본 교정 시스템의 반사판은 직경이 95mm, 두께가 14mm인 스테인레스 스틸을 사용하여 제작하였으며, 표면에서의 반사 특성을 좋게 하기 위해 연마제를 사용하여 조도가 약 0.02μm 정도가 되도록 래핑하였다. 또한 반사판은 링크 시스템에 의해 평면으로부터 약 ±45° 회전된다.

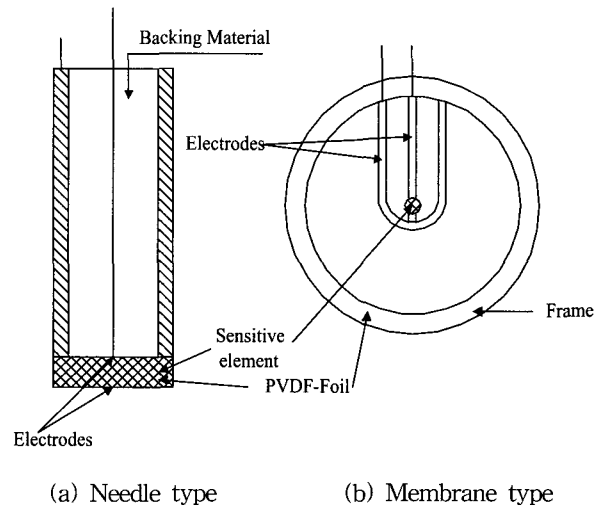


그림 6. 두 종류 하이드로폰의 구조도.
Fig. 6. Schematic diagram of two types of hydrophone.

측정에 사용된 물은 초순수 제조장치(Milli-Ro+Milli-Q Labo)에 의해 18MΩ의 비저항치를 갖도록 만들었으며, 진공펌프(GVD-165A)를 사용하여 물 속에 녹아있는 가스와 기포를 제거하였다. 일반적으로 사용되는 물의 산소 함유량은 78%(1%=0.2mg/l)정도이며, 감도측정에 적합한 물의 산소 함유량은 측정 결과 약 50% 이하로 확인되었다. 본 장치를 이용하여 물 속에 있는 가스를 제거한 결과, 산소 함유량이 약 33-40% 정도로 줄어들었으며, 이 상태에서 대기 중에 24시간 방치하여 두면 약 70%로 증가된다는 것을 실험을 통해 확인하였다. 따라서 초음파 감도 측정 시에는 12시간 주기로 물을 교환하고, 물의 온도는 19.9°C에서 25.0°C 사이로 조절하였다.

V. 감도교정 시스템의 성능평가

감도교정 시스템의 성능 평가에 사용되는 표준 하이드로폰은 대역폭이 넓고 주파수 특성이 균일한 분포를 가져야 하며, 시간과 온도변화에 따른 안정도가 좋아야 한다.

표준 하이드로폰은 구조적인 측면에서 볼 때 그림 6에서 나타난 바와 같이 탐침형과 박막형으로 분류되며, 재질은 폴리머 계통의 PVDF(polyvinylidene fluoride) 필름이 주로 사용된다. 이들 하이드로폰은 정밀 계측을 위해 감지부분의 실효직경이 가급적 작아야 하지만 제작상의 어려움으로 인해 기존의 상용화되어 있는 제품은 0.5mm 정도이다. 본 논문에서는 상용화된 제품 중에서 가장 성능이 뛰어난 Marconi Y-33-7603 (감지부분: 0.5mm, 두께: 0.025mm) 박막형 하이드로폰을 사용하여 감도교정 시스템의 성능을 평가하였다. 또한 NTR사의 TNU 002A(감지부분: 0.6mm, 두께: 0.028mm) 탐침형 하이드로폰에 대해 독일 연방물리기술청(PTB)의 교정결과와 본 논문에서 구성한 교정 시스템에 의한 감도측정 결과를 상호 비교함으로써 교정 시스템의 성능을 확인하였다.

표 1. 역변수들과 이들로부터 결정된 감도값.
Table 1. Values of reciprocity parameter measured for determining sensitivity.

가 역 변 수	감 도 (dB re 1volt/pa)	
	2.0 MHz	10.0 MHz
$M_2 = U_2/p$	-151.02	-150.04
$\sqrt{k_{u01}}$	- 1.08	-0.10
$\sqrt{k_{u02}}$	1.98	2.49
$\sqrt{G_1}$	- 1.50	-1.20
G_2	0.90	-2.40
e^{ad_2}	0.08	1.49
$\sqrt{r_1/r_2} (r_1 \approx r_2)$	0.28	0.28
교 정 값	-150.36	- 149.98

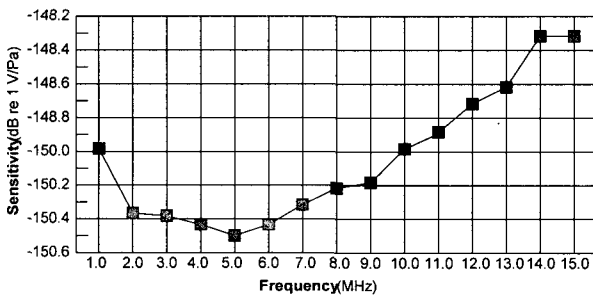


그림 7. Y7603 하이드로폰의 자유음장 감도.
Fig. 7. Free-field sensitivity level of Y7603 hydrophone.

1. 박막형 하이드로폰의 감도교정 결과

알장에서 눈술한 바와 같이 하이드로폰의 감도는 가역변수들을 측정함으로써 최종 결정된다.

표 1은 Y7603 하이드로폰에 대해 2MHz, 10MHz 두 개의 주파수에서 측정된 가역변수들과 이들로부터 결정된 감도값을 나타내고 있으며, 교정 데이터는 네 번 측정하여 평균한 것이다. 2MHz 주파수에 대한 감도교정에는 송신용 변환기로 Panametric 사의 직경이 V304(공칭 주파수: 2.25MHz, 직경: 1인치)을 사용하였다. 측정은 물의 온도가 21.2°C, 변환기와 반사판의 거리(d_1)와 반사판과 하이드로폰의 거리(d_2)를 동일하게 0.091m로 유지한 상태에서 행하였다. 10 MHz 주파수에 대한 감도교정에는 송신용 변환기로 V311(공칭주파수: 10MHz, 직경: 0.5인치)을 사용하였으며, 측정 시에 물의 온도는 22.0°C, d_1 과 d_2 는 0.072m로 유지한 상태에서 행하였다. 표 1에 나타난 가역변수 중에서 M_2 , k_{u01} , k_{u02} 는 실측에 의한 값이다. Y7603 하이드로폰의 감도는 표 1에 나타난 바와 같이 2MHz 주파수에서 -150.36dB, 10MHz에서 149.98dB로 최종 산출되었다.

1MHz에서 15MHz까지의 주파수 대역에서 1MHz 간격으로 주파수를 변화시키면서 상기와 같은 방법으로 측정된 Y7603 하이드로폰의 감도는 그림 7과 같다. 그림 7에 나타난 바와 같이 하이드로폰의 감도는 150 ± 0.5 dB

이내의 매우 평탄한 주파수 특성을 가지고 있으며, 전자파 방해나 시간 및 온도 변화와 같은 외부환경 변화에 대해 안정도가 좋기 때문에 표준 하이드로폰으로 적합하다는 것을 알 수 있다.

가역교정 시스템의 계통오차는 크게 전류와 전압의 측정오차와 개방회로 및 회절손실 보정 등에 따른 오차로 나눌 수 있다. 전류와 전압의 측정오차는 주파수에 따라 약간의 차이는 있지만 방대한 양의 실험 데이터를 분석해 볼 때 이와 같은 오차에 의해 야기되는 교정 시스템의 불확도는 약 ± 1.7 dB로 주어진다. 개방회로 및 회절손실 보정 등에 따른 오차는 약 ± 0.2 dB 정도로 평가되었다.

교정 시스템의 우연 불확도는 다음 네가지 경우에 대해 반복 측정함으로써 확인하였다.

- 1) 주파수 분석기를 포함한 교정 시스템의 주 전원을 끄고 수분 후에 가동시켜 송신용 초음파 변환기에 가해진 전압을 전 상태로 다시 조절했을 때의 하이드로폰의 감도 변화
- 2) 임의의 초음파 음장하에서 4축 이송장치를 미소 조정 후, 원 위치시켰을 때의 전 상태에 대한 감도 변화
- 3) 물을 교체한 다음 한시간 지난 후, 재 측정하였을 때의 감도 변화
- 4) 하이드로폰을 제거하였다가 다시 원 위치시켰을 때의 감도 변화

Y7603 하이드로폰을 이용하여 상기와 같은 방법으로 네 번씩 측정한 재현성 실험 결과, 1MHz 주파수에 대해 ± 0.5 dB, 10MHz에 대해 ± 0.7 dB, 15MHz에 대해 ± 1.0 dB의 표준편차를 얻었다. 이와 같은 오차를 유발시키는 원인은 크게 기계적인 요인과 전기적인 요인으로 나눌 수 있다. 기계적인 요인으로는 수막 현상과 온도변화에 기인한 하이드로폰 진동막의 임피던스 변화(0.6%/°C)와 하이드로폰의 위치변화 등을 들 수 있다. 전기적인 요인으로는 주파수 분석기 및 전치 증폭기 등을 포함한 측정 장비의 시스템 오차와 초음파 변환기에 인가되는 전압을 전 상태와 같은 전압으로 조정하는 문제 등으로 나눌 수 있다.

이제까지 교정 시스템 내에서 유발될 수 있는 중요한 오차 발생원에 대해 기술하였다. 이외에도 불규칙하게 발생하는 오차요인들이 있을 것으로 판단되나 상기 오차 요인을 분석해 볼 때 교정 시스템의 측정 불확도는 ± 2.0 dB 정도로 평가된다.

2. 탐침형 하이드로폰의 감도교정 결과

TNU 002A 하이드로폰은 직경이 0.6mm, 사용 주파수 대역이 1MHz에서 15MHz 까지이며, PVDF 필름 두께가 0.028mm인 탐침 변환기로서 음장분포 측정용으로 주로 사용된다. 그림 8은 상기 하이드로폰에 대해 독일 연방기술청으로부터 교정된 감도값과 본 논문에서 구성한 교정 시스템에 의해 측정된 감도값(마름모)의 상대비교 결과를 보여준다.

두개의 교정 데이터는 네 번 반복 측정하여 평균한

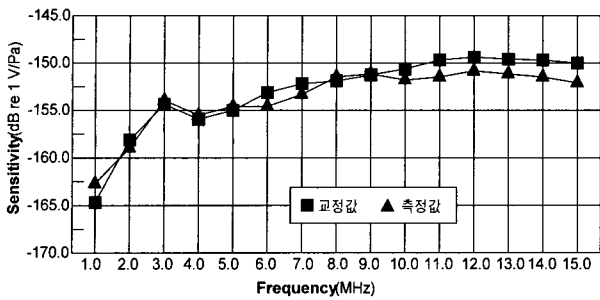


그림 8. TNU 002A 하이드로폰의 자유음장 감도.
Fig. 8. Free-field sensitivity level of TNU 002A hydrophone.

표 2. PFS 005A 전치 증폭기의 주파수 증폭 이득.
Table 2. Amplification factor of the PFS 005A preamplifier.

주파수 (MHz)	감도 (dB re 1 volt/pa)		이득 (dB)
	하이드로폰	하이드로폰 + 전치증폭기	
1.0	- 163.0	- 142.1	20.9
2.0	- 159.0	- 137.5	21.5
3.0	- 153.8	- 122.8	21.0
4.0	- 155.6	- 134.1	21.5
5.0	- 154.5	- 132.9	21.6
6.0	- 154.5	- 132.9	21.6
7.0	- 153.0	- 131.5	21.5
8.0	- 151.0	- 129.3	21.7
9.0	- 150.8	- 129.5	21.3
10.0	- 151.7	- 130.3	21.4
11.0	- 151.4	- 130.2	21.2
12.0	- 150.6	- 129.4	21.2
13.0	- 150.8	- 129.6	21.2
14.0	- 151.4	- 130.3	21.1
15.0	- 152.1	- 131.1	21.0

것으로 그림에 나타난 바와 같이 전 주파수 대역에 걸쳐 2dB 이내에서 일치하는 것을 볼 수 있다. 특히 1MHz와 15MHz에서의 큰 차이는 교정 시스템의 정밀도와 하이드로폰 자체의 전기-음향적 특성의 불안정이 복합적으로 작용한 때문이며, 고주파 영역으로 갈수록 두 값의 차이가 증가하는 것은 하이드로폰의 지향성 문제인 것으로 판단된다. 주파수에 따른 감도 특성은 Y7603 하이드로폰에 비해 평탄하지 않으며, 3MHz 이하의 주파수 대역에서 현저한 저하현상을 나타내기 때문에 표준 하이드로폰으로 사용하기에는 부적합하다.

동일한 조건하에서 네 번 측정된 결과로부터 측정 불확도는 10.0MHz 이하의 주파수 대역에서 ±1.5dB, 10 MHz 이상의 대역에서 ±4.0dB로 산출되었다. 10MHz 이하의 대역에서 ±1.5dB의 측정 불확도는 하이드로폰이 매우 작은 병렬저항을 가지고 있기 때문에 측정시 계측 장비와의 임피던스 부정합에 기인된 영향으로 판단되며, 특히 작은 병렬저항으로 인해 3MHz 이하의 영역에서

PVDF 하이드로폰으로서는 특이한 주파수 특성을 나타내고 있다.

10MHz 이상의 대역에서 ±4.0dB의 불확도는 하이드로폰의 기하학적인 중심축과 음향중심이 일치하지 않기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 10MHz 이상의 대역에서 하이드로폰의 정확한 성능평가를 위해서는 지향특성을 정밀 측정함으로써 확인될 수 있으나 본 연구실에 아직 지향특성 측정을 위한 시스템이 구비되어 있지 않은 관계로 추후 수행되어야 할 주요과제로 남는다.

NTR사의 PFS 005A(S/N:92030203) 전치 증폭기의 주파수에 따른 증폭이득은 표 2와 같다. 전치 증폭기의 증폭이득은 전치 증폭기와 TMU 002A 하이드로폰을 한 시스템으로 결합하여 측정된 감도값과 하이드로폰 자체만의 감도값의 상대적 차이를 구해 산출하였다. 표 2에 나타난 바와 같이 하이드로폰의 감도는 5MHz에서 -154.5dB, 하이드로폰과 전치 증폭기를 한 시스템으로 결합한 경우 -132.9dB로 측정되었다. 전치 증폭기의 평균 증폭이득은 약 21.3dB이며, 전 주파수 대역에서 ±0.5 dB 정도의 평탄한 특성을 나타내어 정밀 측정용으로 적합하다고 판단된다.

VI. 결론

감도는 변환기에 입력되는 음압과 이때 변환기에서 발생하는 개방회로 전압의 비를 말하며, 초음파 영역에서의 표준 확립은 변환기의 감도를 결정하기 위한 교정 방법과 교정 시스템을 개발하는 것이다.

본 논문에서는 1MHz에서 15MHz 범위의 주파수 영역에서 교정대상 변환기의 감도를 결정할 수 있는 가역 교정 시스템을 구성하였으며, 상용화된 제품 중에서 가장 성능이 뛰어난 Marconi Y-33-7603 박막형 하이드로폰을 사용하여 감도교정 시스템의 성능을 평가하였다. 또한 다른 종류의 탐침형 하이드로폰에 대해서는 독일 연방물리기술청(PTB)의 교정결과와 본 논문에서 구성한 교정 시스템에 의한 감도측정 결과를 상호 비교함으로써 교정 시스템의 성능을 평가하였다.

가역 교정 시스템의 계통 불확도는 약 ±1.7dB로 산출되었으며, 재현성 실험 결과 1MHz 주파수에 대해 ±0.5dB, 10MHz에 대해 ±0.7dB, 15MHz에 대해 ±1.0dB의 표준편차를 얻었다. 방대한 양의 실험 데이터를 분석해 볼 때 본 가역 교정 시스템의 측정 불확도는 ±2.0dB 정도이며, 이는 국제전기위원회(IEC)에서 제안한 측정 불확도 ±1.5dB에 미치지 못하는 수준으로 판명되었다. 분석 결과, 자체 제작한 전치 증폭기의 전기적 특성 및 실내온도의 변화와 외부 진동과 같은 실험실의 환경 요인 등이 문제로 지적되었다.

교정 시스템의 성능평가는 다른 연구기관과의 상호 비교교정을 통해 모색하는 것이 바람직하며, 이를 위해 Marconi Y-33-7603 박막형 하이드로폰을 표준기로 선정하여 본 논문에서 구성한 교정 시스템으로 측정된 감도값과 대의 교정값을 상호 비교함으로써 교정 시스템의 성능에 대한 정밀 분석과 보안을 계속 시도해 나갈 것이다.

참고문헌

- [1] W. Schottky, "The concept reciprocity in acoustics and electro-acoustics," *J. Physics*, vol. 36, pp. 689-736, 1926.
- [2] The characteristics and calibration of hydrophones for operation in the frequency range 0.5 to 15 MHz, *IEC Publication 866*, 1985.
- [3] G. Ludwig and K. Brendel, "Reziprozitat-skali-brierung von Hydrophonen mit der Time Delay Spectrometry," *Fortschritte der Akustik, DAGA 86*, pp. 845-848, 1986.
- [4] K. Beissner, "Free field reciprocity calibration in the transition range between near field and far field," *Acustica*, vol. 46, pp. 162-167, 1980.
- [5] B. A. Hermann and G. R. Harris, "Calibration of miniature ultrasonic receivers using the planar scanning technique," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 72, no. 5, pp. 1357-1363, 1982.
- [6] D. R. Bacon, "The improvement and evaluation of a laser interferometer for the absolute measurement of ultrasonic displacements in the frequency range up to 15MHz," *Nat. Physical Lab., Acoustics Rep. AC109*, 1986.
- [7] A. L. Dimattia and F. M. Wiener, "On the absolute pressure calibration of condenser microphones by the reciprocity method," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 18, pp. 341-344, 1946.
- [8] K. Brendel and G. Ludwig, "Calibration of ultrasonic standard probe transducer," *Acustica*, vol. 36, no. 3, pp. 203-208, 1976.
- [9] R. J. Bobber, "General reciprocity parameter," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 39, no. 4, pp. 680-687, 1965.
- [10] K. Brendel and G. Ludwig, "Calibration of hydrophones based on reciprocity and time delay spectrometry," *IEEE T-UFFC*, vol. 35, no. 2, pp. 168-174, 1988.
- [11] K., Beissner, "Exact integral expression for the diffraction loss of a circular piston source," *Acustica*, vol. 49, pp. 212-217, 1981.
- [12] J. M. M., Pinkerton, "A pulse method for the measurement of ultrasonic absorption in liquids," *Nature*, vol. 160, pp. 128-129, 1947.

사공 성 대

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제2권, 제4호, 참조.



조 문 제

1957년 1월 1일생. 1975년 3월-1979년 2월 아주대학교 전자공학과(공학사). 1979년 3월-1981년 2월 연세대학교 전자공학과(공학석사). 1982년 3월-1990년 8월 연세대학교 전자공학과(공학박사). 1992년-현재 한국음향학회 편집위원 및 분과위원장. 1982년 3월-현재 한국표준과학연구원 역학연구부 책임연구원. 주관심분야는 초음파 및 음향분야의 계측, 소음제어, 건축음향.

최 봉 열

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제2권, 제4호, 참조.