

초음파 파워 측정 시스템 구성 및 성능평가

Construction of Ultrasonic Power Measurement System and Its Performance Evaluation

조 문 재*, 김 용 태*, 윤 용 현*, 정 성 수*

(Moon Jae Jho*, Yong Tae Kim*, Yong Hyeon Yun*, Sung Soo Jung*)

*한국표준과학연구원 물리표준부 음향진동그룹

(접수일자: 2005년 7월 25일; 채택일자: 2005년 9월 14일)

초음파 파워의 정확한 측정은 초음파 의료 장비의 품질 보증과 안전성에 중요하다. 본 논문에서는 초음파 조사가 on/off를 반복하는 동안의 표적에 작용하는 방사 힘과 부력과 같은 다른 원인에서 기인하는 저울 지시 값의 시간에 따른 변화로부터 초음파 파워를 결정하는 간단한 이론을 제시하였다. 아울러 개발된 초음파 파워 측정 시스템에 대해 정밀 기계적 정렬장치, 전기신호 발생부 구성, 제어 및 측정부 구성 및 적절한 절차와 함께 상세히 기술하였다. 본 시스템으로 1 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz에서 10 mW에서 10 W 범위에 걸쳐 측정된 결과를 다른 나라에서 교정된 기준 데이터와 상호 비교한 결과 상대 편차가 5 % 이내로 확인되었다.

핵심용어: 초음파 파워, 방사힘, 흡음형 표적, 초음파 감쇠, 음속

투고분야: 초음파 및 탄성파 분야 (4.1)

The precise measurement of ultrasonic power is important to the quality assurance and the safety of medical ultrasonic equipments. In the present work, a brief theory was introduced to determine the ultrasonic power from the time varying balance-indication due to the radiation force acting on an absorbing target and/or other causes such as buoyancy during the repetition of on/off behavior of ultrasonic irradiation. The developed automated system measuring the ultrasonic power was described in detail with the precise mechanical alignment tool, the electric signal generation network, the control and measurement network, and the appropriate procedure. The ultrasonic power measured by the developed system was compared to the reference data calibrated by the other national metrology institute at 1 MHz, 5 MHz, 10 MHz, and 15 MHz over the range 10 mW to 10 W. Their relative differences are within 5 %.

Keywords: Ultrasonic power, Radiation force, Absorbing target, Ultrasonic attenuation, Sound speed

ASK subject classification: Ultrasonic and Elastic Waves (4.1)

I. 서론

초음파가 영상진단기, 물리치료기 등과 같은 의료용 기기로 사용됨에 따라 초음파 음장 특성은 환자의 안전 및 장비의 품질관리 측면에서 제조업체의 최대 관심사로 대두되었다. 특히 의료용 초음파 변환기로부터 방사되는 음향파워(초음파 파워)는 초음파 안전에 관련된 가장 기본적인 물리량으로서, 1 MHz에서 15 MHz 주파수 범위에 걸쳐 10 mW에서 10 W 정도의 범위에서 사용되고 있다.

초음파 파워의 측정은 측정용 표적(target)에 가해진 방사 힘(radiation force)을 측정하여 결정하는 방법[1], 교정된 하이드로폰(hydrophone)을 사용하여 초음파 음장 내를 주사하여 결정하는 방법[2], 광-음향 효과를 이용하는 방법[3], 열역학적 방법[4] 등이 있다. 열역학적 방법은 초음파를 완전히 흡수하는 흡음재료 내부에 온도계를 설치하여 제작된 센서에 초음파를 조사시킬 때의 포화온도를 측정하여 초음파 파워를 결정하는 방법으로, 측정의 정밀도가 표적재료의 열감도(단위 초음파파워에 대한 온도증가[5])에 의존한다. 따라서 열평형이 될 때까지 기다려야 하기 때문에 측정에 소요되는 시간이 길며, 표적재료의 열에 의한 물성변화에 취약하다는 단점을 지니고 있다. 광-음향 효과를 이용한 방법은 매질의

통신저자: 김 용 태 (ytkim@kriss.re.kr)
305-340 대전시 유성구 도룡동 1번지
한국표준과학연구원 물리표준부 음향진동그룹
(전화: 042-868-5301, 팩스: 042-868-5643)

밀도 변화에 수반되는 광 굴절율의 변화를 이용한 Raman-Nath 방법을 개선한 것으로, 초음파 음장 내부에 레이저를 집속하여 광세기의 변화를 측정하면 레이저 집속점에서의 음향세기를 결정할 수 있다. 이를 방사 측에 수직한 평면을 주사한 다음 적분하여 초음파 파워를 결정한다. 따라서 이 방법은 측정 시스템의 구성이 복잡하고, 측정 시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 교정된 하이드로폰을 이용한 음장주사 방법은 초음파 발생원으로부터 방사된 초음파가 통과하는 평면상의 여러 위치에서의 음압을 측정하여 음향파워를 결정하기 때문에 방사 힘 측정방법에 비해 측정 시간이 길고 정밀도가 다소 떨어지는 것으로 발표되고 있다. 방사힘을 측정하여 음향 파워를 결정하는 방법은 근거리 음장과 원거리 음장에 무관하게 임의의 위치에서 측정할 수 있을 뿐만 아니라 측정 장비를 교정하거나 조정하기에 매우 용이하다는 장점이 있다. 이와 같은 특징에 의해 방사힘 측정을 이용한 음향파워 측정방법은 의료기에 사용되고 있는 1 MHz에서 15 MHz의 주파수 대역에서 주로 사용되며, IEC (International Electro-technical Commission)에 의해 권장되고 있다[6].

방사힘 측정법을 이용한 초음파 파워 측정에는 흡음형 표적과 반사형 표적 두가지가 주로 이용된다. 초음파가 반사형 표적에 입사할 때 저울 지지값은 방사힘에 대해서만 변화하는 반면, 흡음형 표적에 입사할 때에는 방사 힘 이외에 부력의 변화를 동반한다. 본 논문에서는 흡음형 표적을 사용할 때 방사힘과 부력변화가 혼재된 저울 지지값의 시간에 따른 변화로부터 방사힘을 수치적으로 분리하여 초음파 파워를 결정하는 방법을 제시하였다. 또 이를 구현하기 위해 개발된 측정 시스템의 구성, 측정에 영향을 미치는 중요 인자들에 의한 보정 및 편차 산정 예를 실제 측정 데이터를 이용하여 상세하게 기술하였다. 끝으로 주파수 1 MHz - 15 MHz, 출력 10 mW - 10 W 범위에서의 성능을 해외교정 결과를 기준값으로 비교하여 평가한 결과 등을 제시하였다.

II. 방사힘 측정원리

음향 임피던스가 다른 두 매질의 경계에 초음파가 입사하면 음향 에너지가 감소하는 방향으로 힘이 작용하며, 이 힘을 방사 힘이라 한다. 그림 1에 나타난 바와 같

이, 초음파 진행 경로 상에 표적을 위치시킨 경우, 표적 전면과 후면에서의 음향 에너지 밀도의 차에 비례하는 방사 힘이 표적에 작용한다. 방사 힘은 표적 전면에서의 반사와 후면을 통한 투과 정도에 따라 달라지기 때문에, 초음파 파워 측정에는 초음파 에너지를 전부 흡수하거나 전면에서 모두 반사하는 두 가지 종류의 표적이 주로 사용된다. 반사형 표적은 입사파와 표적으로부터 반사된 파의 간섭을 최소화하기 위해 원뿔 형태로 되어 있는데 이와 같은 반사용 표적을 사용할 경우 초음파 파워는 표적 경사면에 대한 법선방향과 초음파의 진행방향이 이루는 각의 함수로 주어진다[6]. 따라서 반사형 표적을 사용한 경우에는 초음파 변환기와 표적 사이의 거리에 따른 감쇄 보정량을 정확히 산정하기 어려울 뿐만 아니라 정확한 각도로 표적을 정렬시키는 것이 어렵기 때문에 정밀 측정에는 흡음형 표적이 유리하다. 본 논문에서는 흡음형 표적에 대한 방사 힘 측정원리와 이를 사용한 초음파 파워 측정시스템에 국한하여 기술하기로 한다.

표적이 초음파를 100 % 흡수한다고 가정하면, 표적에 작용하는 방사 힘 F_r 은 다음과 같이 표적 전면에서 입사하는 평면파의 음향 에너지 밀도 I/c 에 비례한다.

$$F_r = \frac{IS}{c} = P_i/c \tag{1}$$

여기서 I 는 음향세기, c 는 매질에서의 음속 (23 °C 순수한 물의 경우 1,491 m/s), S 는 표적 전면의 면적, P_i 는 표적 전면에서 입사하는 초음파의 음향파워이다. 초음파 변환기와 표적 사이의 거리 z 를 진행하는 동안 초음파

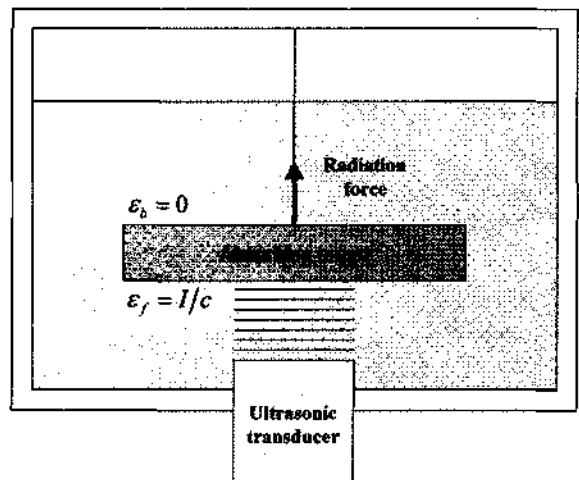


그림 1. 초음파에 의해 흡음형 표적에 작용하는 방사힘
Fig. 1. The radiation force acting on an absorbing target caused by ultrasound.

파워는 $\exp(-2az)$ 만큼 감쇠되어, 실제 표적에 입사하는 음향파워는 $P_i = P_0 \exp(-2az)$ 로 주어진다. 여기서 P_0 는 초음파 변환기에서 방사된 음향파워이고, a 는 물에서의 감쇠계수로 주파수에 의존한다. 따라서 초음파 변환기가 방사하는 음향파워 P_0 는 다음과 같다.

$$P_0 = F_r c \cdot \exp(2az) = m g c \cdot \exp(2az) \quad (2)$$

여기서 m 은 방사 힘에 의한 저울 지시 값의 변화량, g 는 중력가속도이다. 식 (2)에서 보는 바와 같이, 초음파 파워의 결정을 위해서 알아야 하는 값은 다섯 가지이다. 이 중에서 m 과 z 는 측정으로 결정하고, g, c, a 는 기존 논문이나 문헌 등에서 보고된 값을 이용할 수도 있고 측정하여 사용할 수도 있다.

흡음형 표적에 초음파가 가해지면 일차적으로 방사 힘에 대응하는 저울 지시값 변화가 나타나며, 뒤이어 부력에 의한 저울 지시값의 변화가 나타난다. 스위치를 끄면 방사 힘이 순간적으로 사라지고 시간지연을 갖고 나타나는 부력의 변화에 의한 저울 지시값 변화가 남는다. 이러한 부력의 변화는 비선형적 시간의존 특성을 지니고 있지만 비교적 짧은 시간 동안 on/off를 반복하면 이 변화를 선형 함수로 근사할 수 있다. 방사 힘에 의한 저울 지시값의 변화량의 결정은 시간의 함수로 기록된 저울의 지시값 변화 데이터를 이용하여, 초음파 조사(irradiation) 이전까지의 데이터의 일차 함수 추세선 $y_1 = a_1 t + b_1$ 맞추기 결과와 초음파를 on 한 시점부터 off 한 시점까지의 데이터를 일차함수 추세선 $y_2 = a_2 t + b_2$ 맞추기 한 결과에서 초음파를 on 한 시점 t_0 에서의 차이로 다음과 같다.

$$m = y_2(t_0) - y_1(t_0) = (a_2 - a_1)t_0 + (b_2 - b_1) \quad (3)$$

III. 측정장치 및 방법

본 논문에서 구성한 초음파 파워 측정 시스템은 종류 수 내에서 중력이 작용하고 있는 흡음형 표적에 초음파가 입사하여 발생한 중력에 반하는 방사 힘을 전자저울을 이용하여 질량 단위로 측정하는 중량 분석적 (gravimetric) 방법이다.

그림 2에 나타난 바와 같이 측정 장치는 크게 초음파

변환기에 신호를 가해주는 구동부와 변환기로부터 방사된 방사 힘을 측정할 수 있는 계측부로 구성되어 있다. 구동부는 신호 발생기 (8642A, HP Co.)로부터 나온 신호의 주파수를 측정하기 위한 주파수 계수기 (775A, Keithley Co.)와 변환기에 인가되는 전압을 측정하기 위한 전압계 (9303, Racal dana Co.) 및 신호 파형을 관찰하기 위한 오실로스코프 (V1060, Hitachi Co.) 등으로 이루어진다. 계측부는 초음파 변환기, 수조, 정렬장치, 밀폐용 2단 투명 케이스 등의 기구들과 자체 제작한 정렬장치 제거기, 전자저울 (SAG105, Mettler-Torredo Co.), 디지털 기압계 (DPI-140, Druck Co.), 기온 및 상대습도 측정기 (TR-72S, T&D Co.), 수온 측정용 백금저항 온도계 (F25, ASA Co.) 등으로 이루어진다. 그림 2에는 나타나지 않았지만, 증류수의 용존 산소 측정기 (MO-128-10M, Mettler-Torredo Co.), 전기전도도 측정기 (MCI26-10M, Mettler-Torredo Co.), 산도 측정기 (MP128FK, Mettler-Torredo Co.) 등의 장비는 측정에 사용되는 물의 상태를 점검하기 위한 보조 장비로 실험 전과 후에 한번씩 사용된다.

그림 3은 초음파 파워 측정용 기구장치의 실물사진으로, 1,000 kg 이상의 하중을 견딜 수 있는 철골 구조 (가로: 900 mm, 세로: 800 mm, 높이: 350 mm) 위에 4개의 공기 용수철 (air spring, PNEURIDE 6x2, Dunlop co.) 및 그 위에 석정반 (가로: 1,000 mm, 세로: 900 mm, 높이: 100 mm, Micron정밀 co.)을 올려 놓은 방진 테이블로 구성되어 있다. 방진 테이블의 수평은 정밀도 0.02 mm/m 인 수평계 (150, Obishi-Keiki)를 관찰하면서 공기 용수철 내부의 공기압을 조절하여 맞춘다. 방진 테이블 위에 배치되는 2 단의 투명 케이스는 측정 시스템의 공기 유동에 의한 영향을 최소화하기 위한 밀폐 장치이다. 이 케이스를 2 단으로 구성한 것은

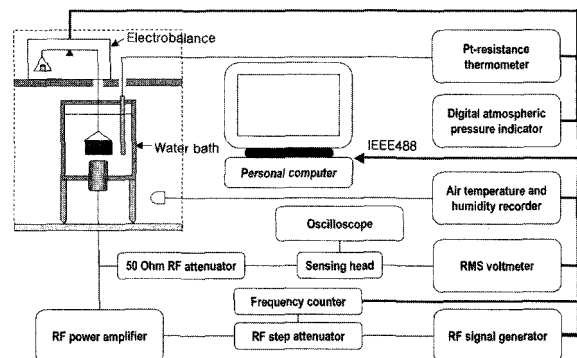


그림 2. 초음파 파워 측정 시스템 구성도

Fig. 2. Experimental setup of the ultrasonic power measurement system.

수조 보다 상단에 배치되는 저울을 지지하기 위한 것이다. 상단과 하단을 분리하는 판과 밀판은 가로 800 mm, 세로 700 mm, 두께 20 mm인 열처리된 알루미늄 판 2 장을 사용하여, 직경 30 mm, 높이 700 mm인 스테인레스 304 강철 봉 6 개로 두 판이 서로 평행을 유지하도록 제작하였다. 가장 아래쪽에 배치된 알루미늄 판에 4 개의 다리 겸용 수평 조절 나사와 정밀 정렬을 위한 3 축 이송 스테이지가 설치되어 있다. 2 단 케이스는 3 축 이송 장치를 포함하여 총 중량이 약 200 kg 이다.

3-축 이송 스테이지 (가로: 400 mm, 세로: 720 mm, 높이 500 mm)의 수평 방향의 두 축 (x-축 및 y-축)은 마이크로미터 헤드 (분해능: $5 \mu\text{m}$)를 이용한 수동 이송 방식이며, 수직 축(z-축)은 타이밍 벨트와 교류 서보 모터 (AC servo motor, FDA-5004, LG-OTIS Co.)를 이용한 전동 방식이다. 전동 방식으로 구동하는 z-축에는 LM-가이드 (B-M6F, THK Co.)와 ball screw (BIF 1605-5, THK Co.)를 사용하였으며, 분해능 $1 \mu\text{m}$ 인 디지털 길이 표시기 (MKT1, Fagor Co.)와 충격을 방지하기 위한 리미트 스위치 2 개가 상단과 하단에 각각 부착되어 있다. x-축과 y-축의 최대 이송거리는 각각 20 mm이고, z-축의 최대 이송 거리는 150 mm이다. 수조

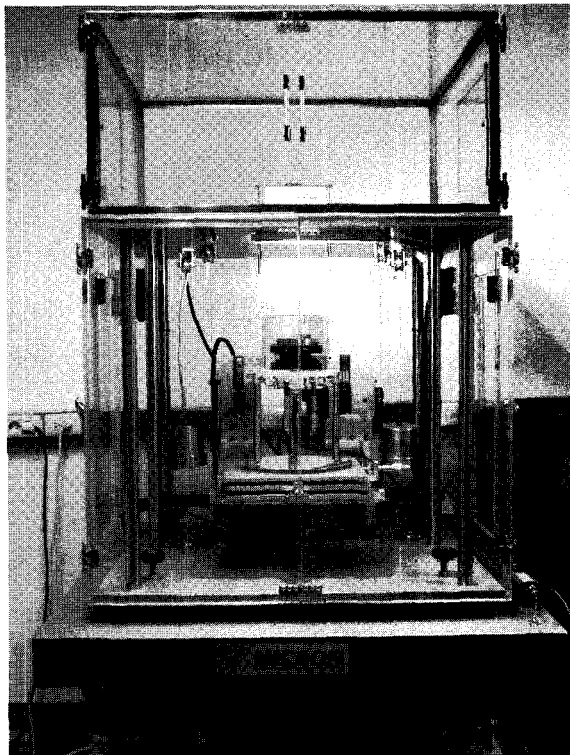


그림 3. 초음파 파워 측정 시스템의 가구부 실물사진

Fig. 3. Photograph of the mechanical part of the ultrasonic power measurement system.

의 무게에 의해 스테이지가 기울어지는 것을 바로잡기 위해 x-y 스테이지를 지지하는 수평판 앞쪽 좌우에 스테인레스 강철 줄을 고정하고, 각각의 끈이 2 개의 도르래를 거쳐 뒤쪽에서 수평 보정용 질량체 (counter mass)를 올려놓을 수 있는 구조를 채택하였다.

수조는 약 $2,650 \text{ cm}^3$ (내경: 150 mm, 높이 150 mm)의 부피를 갖도록 두께 5 mm 원통형 아크릴 관을 사용하여 제작하였다. 수조 위 부분은 물 표면에서의 증발, 대류 현상으로부터 야기되는 신호의 불안정성을 최소화하기 위해 표적을 전자저울에 연결하기 위한 직경 0.05 mm의 백금선이 지나가는 구멍 (직경 10 mm)을 제외하고는 모든 부분을 밀폐하였다. 수조는 직경 10 mm, 길이 150 mm인 스테인레스 봉으로 제작된 세 개의 다리에 의해 지지되어 있으며, 다리 아래 부분에는 수조의 수평을 맞추기 위해 높이 조절용 나사를 삽입하였다. 수조 아래 부분은 정 중앙에서 초음파 변환기가 바닥 면을 관통하여 방사 면이 위쪽을 향하도록 설치할 수 있도록 제작하였다.

투명 케이스 상단의 전자저울은 분해능이 $10 \mu\text{m}$ 이며, 계측부와 지시부가 분리되어 있다. 전자저울의 출력부는 RS232 인터페이스로 컴퓨터와 데이터 전송이 가능하다. 이 전자저울은 세 개의 다리로 받치고 있으며, 앞의 두 다리에는 수평 조절 나사를 부착하여 저울에 장착된 자체 수준기를 보면서 수평을 맞출 수 있다.

정렬장치 제어기는 PCI 버스 방식의 48-bit 디지털 입출력 인터페이스 카드 (PCI-1751, Advantech Co.)와 SCSI-II 방식 터미널모듈 연결장치 (ADAM-3968/20), 회전 부호기 일체형 미소 이동 제어 핸들 (ENH, Autonics Co.), 7 개의 액정 숫자 표시기 (DISA, Autonics Co.)를 이용하여 제작하였다. 이 제어기는 z-축의 이송 거리를 디지털 길이 표시기의 지시 값을 기준으로 제어된다. 이 제어기는 외장형 장치로 2 단 투명 케이스 아래 칸의 아크릴 외벽 상단에 부착된 2 개의 공기 순환 팬 (4C-230HS, BI-sonics Tech. Co.) 및 조명 장치 (30 W, DL-07WC, Bormred Co.)들의 on/off 스위치와 디지털 표시기 지시값 초기화 스위치가 부착되어 있으며, 자동 이송 및 위치 데이터 수집에 관련된 명령들을 RS-232 전송 케이블을 통해 컴퓨터와 주고받을 수 있도록 제작하였다.

흡음형 표적은 독일 연방물리기술청 (PTB)에서 개발된 것을 사용하였다. PTB에서 개발된 표적은 Ethylen-Propylen-Terpolymer 합성고무를 원료로 제작되었으

며, 표면 반사를 최대한 줄이기 위해 초음파 음장에 노출되는 부분이 썩기형으로 되어 있다. 이 표적은 썩기 사이의 거리는 5 mm, 각도는 45°, 순수한 고무로 되어 있는 썩기의 길이는 5 mm이고 물에 직접 접촉되도록 노출되어 있다. 표적의 직경과 두께는 가해지는 초음파 음장의 빔폭과 주파수 및 파워 범위에 따라 결정되는데, 직경 50 mm 두께 30 mm, 직경 60 mm 두께 15 mm, 직경 60 mm 두께 7 mm 3 종을 보유하고 있다. 여기서 두께는 썩기 길이를 제외한 값이다.

초음파 변환기는 압전 소자 (PZT 5A, Valpey-Fisher Co.)를 사용하여 명목주파수가 1 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz인 네 종류를 제작하여 측정 장치의 성능을 평가하였다. 송신용 초음파 변환기의 구조는 그림 4와 같다.

그림 4에 나타난 바와 같이 초음파 변환기는 air-backing 형태로 구성되어 있으며, 압전 소자의 진동판과 스테인레스 케이스 사이는 전기적 단락을 방지하기 위해 테프론 링을 사용하여 분리시켰다. 압전소자와 테프론 링 사이는 진동판의 원활한 구동과 방수를 위해 유연성 있는 방수용 플라스틱 접착제 (Fluid-D, Teroson Co.)로 접착되어 있다. 이와 같이 제작된 초음파 변환기는 외부직경이 30 mm, 총 길이가 80 mm인 원통형 구조로 되어 있으며, 변환기의 실제 방사면의 직경은 종류마다 차이가 있다.

측정에 사용하는 물은 초순수 제조장치 (Rios-16, Millipore Co.)로 만들었으며, 오일 로터리 진공펌프

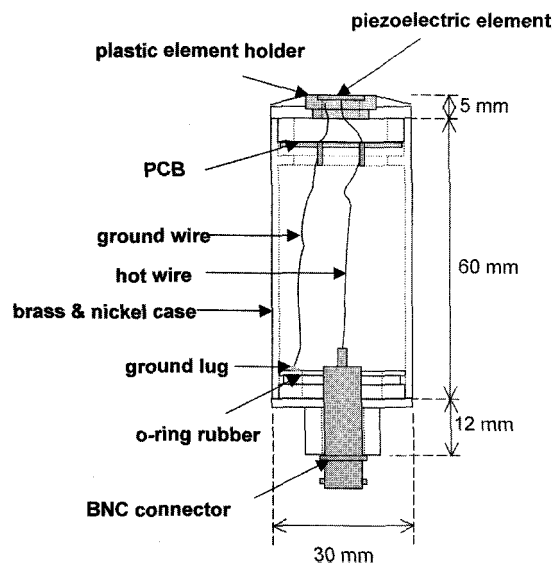


그림 4. 초음파 변환기의 단면도
Fig. 4. Cross-sectional diagram of the ultrasonic transducer.

(W2V20, Woosung Co.)로 약 2 kPa의 진공상태로 12 시간 이상을 유지하여 물속에 함유되어 있는 가스와 기포를 제거하여 만든다. 제조된 기포가 제거된 순수한 물을 비이커에 담은 다음 물의 전기전도도, 산도 (pH) 및 용존 산소량을 측정하여 기록하고, 흡음형 표적, 표적 결이용 백금선을 비이커에 함께 담아 1 시간 이상 젖게 (wetting) 한다. 측정용 수조에 제조된 물과 함께 초음파 변환기를 설치하고 뚜껑을 닫고 같은 시간 동안을 방치한다. 1 시간이 경과하면, 비이커에 담긴 표적과 백금선을 수조에 담고, 수조를 정렬장치에 올려놓는다. 수조와 표적의 수평을 정렬하고, z-축 이송제어기의 미소 이동 제어 핸들을 조작하여 전자저울의 지시값이 급격히 감소하는 지점에 정 위치 시킨 다음 제어기의 초기화 스위치를 눌러 초음파 변환기와 표적사이의 거리가 0 인 지점으로 설정한다. 다시 미소 이동 제어 핸들을 조작하여 초음파 변환기와 표적사이의 거리를 적당한 값으로 맞춘 다음 이 거리 (a)를 기록한다. 전자저울의 설정 상태를 점검하고, 측정환경에 적합한 설정으로 맞춘다 [7]. 전자저울에 질량이 서로 다른 5 개의 교정된 분동을 차례로 올려놓으면서 저울의 지시 값을 기록하고, 편차와 선형성을 체크한다. 선형성에 문제가 없으면 신호선과 데이터 전송선 등의 배선상태를 점검하고, 초음파 파워 측정 자동화 프로그램을 실행시킨다.

그림 5는 초음파 파워 측정 자동화 프로그램의 측정 환경 설정 화면 설정을 위한 작업 창이다. 그림에서 보는 바와 같이, 이 창에서의 주된 작업은 CW 정현파 신호의 주파수와 신호 발생기의 진폭 전압을 설정하고, on 하여 초음

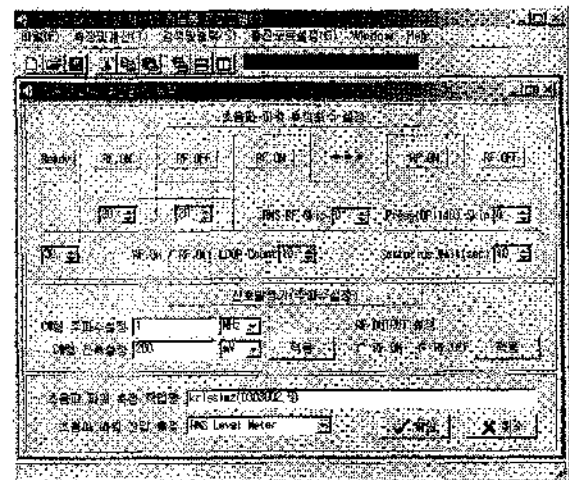


그림 5. 초음파 파워 측정 자동화 프로그램의 측정 환경 설정 작업 창
Fig. 5. The graphic user interface window in the automation program for the setup of the measurement condition.

파를 방사하는 시간과 off 하여 방사를 멈춘 시간을 설정한다. 아울러 초음파 신호의 on/off의 반복 횟수를 설정한다.

그림 6는 초음파 파워 측정 자동화 프로그램의 자동 측정 실행을 위한 작업 창이다. 이 작업 창에서는 측정 및 제어의 초기화를 통해 각 측정 장비와 컴퓨터 간의 통신 이상 유무를 점검하고, 측정 과정동안 그래프 형태로 감시하여야 할 측정량을 결정하여 설정하면 그림 7과 같이 그래프 창이 나타난다. 그림 6의 좌측 상단에는 주요 계측장비들의 지시 값들을 실시간으로 보여주도록 구성되어 있으며, 초음파 파워 측정 자동 실행을 누르면, 모든 측정이 자동으로 이루어진다. 그림 7은 그래프 감시 물리량으로 수은 변화, 초음파 변환기 인가 전압의 실효치 변화 및 저울 지시 값의 변화를 선택하였을 경우, 초음파 파워 측정 자동화 프로그램의 자동 측정 화면 및

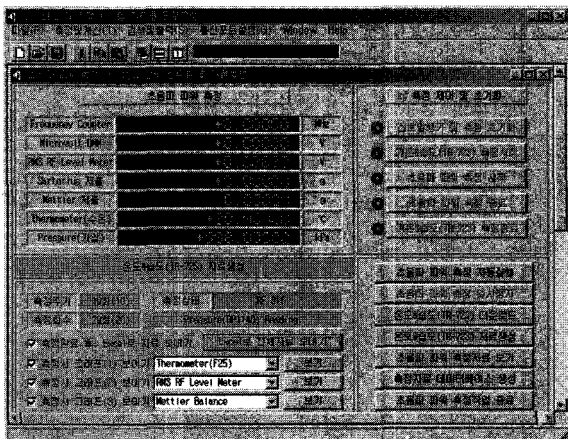


그림 6. 초음파 파워 측정 자동화 프로그램의 자동 측정 실행을 위한 작업 창
Fig. 6. The graphic user interface window in the automation program to perform automatic measurement.

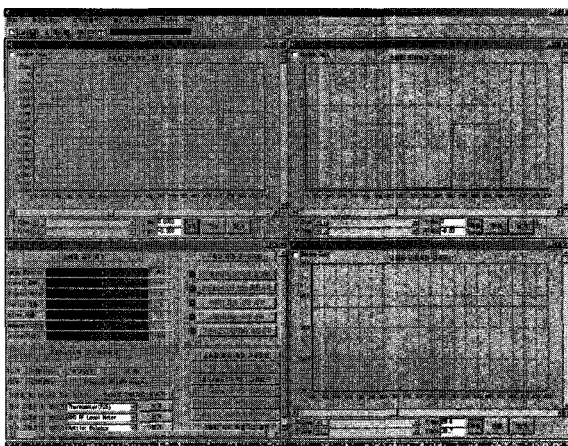


그림 7. 초음파 파워 측정 자동화 프로그램의 자동 측정 화면 및 그래프 감시 창
Figure 7. The output data curve monitoring windows with the graphic user interface window performing automatic measurement in the automation program.

그래프 감시창이다. 측정이 진행되는 동안에 수집되는 데이터는 임시 메모리에 기록되어 있고, 측정이 완료되면 Excel (MS Office 2000, Microsoft Co.) 파일에 자동으로 데이터가 전송되면서 열린다.

IV. 결과 및 논의

그림 8은 초음파가 가해지기 전과 후의 전자저울 지시 값의 시간에 따른 변화를 기록한 결과이다. 초음파가 가해지기 전의 과정 (그림 8의 a 에서 b)동안의 저울 지시 값의 변화는 바로 전에 초음파를 가했을 때의 부력변화가 시간 지연을 갖고 나타나는 현상이다[8]. 초음파가 가해진 순간 (그림 8의 b 지점)에는 방사 힘에 의해 표적에 작용하여 b에서 c'으로 변하여야 하나 저울의 반응이 따라가지 못하여 b에서 c로 증가한다. 이후 초음파가 계속해서 가해지는 동안(c 에서 d)에는 표적에 의해 흡수된 에너지에 의해 체적이 팽창하여 부력이 증가하는 현상이 나타난다. 구간 a에서 b 까지를 선형 추세선 맞춤한 결과 $y_1(t) = 0.0026t + 0.5641$ 과 구간 c에서 d 까지를 선형 추세선 맞춤한 결과 $y_2(t) = 0.0074t + 1.3298$ 을 그림 8에 함께 나타내었다. b 지점의 시각 $t_0 = 13$ s를 대입하여 식 (3)으로 방사 힘에 의한 저울 지시 값의 변화 m 을 구하면, $m = (0.0074 - 0.0026) \times (13) + (1.3298 - 0.5641) \approx 0.828$ mg이다.

물의 감쇠계수는 다음 식을 이용하여 계산한다[9].

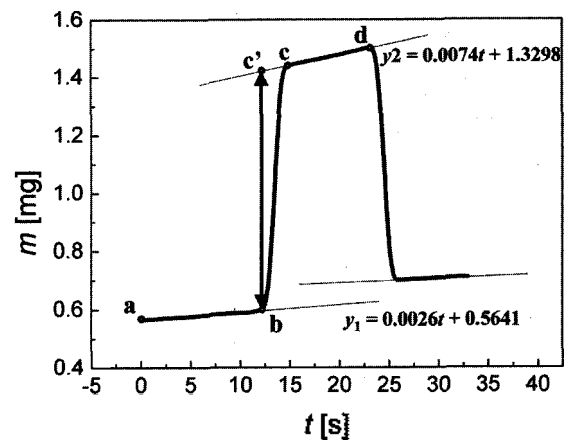


그림 8. 흡음형 표적에 CW 초음파를 1 회 가했을 때 전자저울 지시 값의 시간에 따른 변화

Fig. 8. The time variation of the electro-balance indication for a single incidence of CW ultrasonic irradiation to an absorbing target.

표 1. 주파수 및 거리에 따른 물의 초음파 감쇠가 초음파 파워 측정에 미치는 영향

Table 1. The effect to the ultrasonic power measurements due to the ultrasonic attenuation in water according to the frequency and distance.

f (MHz)	exp(2 az)					[exp(2 az) - 1] [%]				
	at z (mm)					at z (mm)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.00 %	0.01 %	0.01 %	0.02 %	0.02 %
2	1.000	1.000	1.001	1.001	1.001	0.02 %	0.04 %	0.06 %	0.07 %	0.09 %
3	1.000	1.001	1.001	1.002	1.002	0.04 %	0.08 %	0.13 %	0.17 %	0.21 %
4	1.001	1.001	1.002	1.003	1.004	0.07 %	0.15 %	0.22 %	0.30 %	0.37 %
5	1.001	1.002	1.003	1.005	1.006	0.12 %	0.23 %	0.35 %	0.46 %	0.58 %
6	1.002	1.003	1.005	1.007	1.008	0.17 %	0.33 %	0.50 %	0.67 %	0.84 %
7	1.002	1.005	1.007	1.009	1.011	0.23 %	0.46 %	0.68 %	0.91 %	1.14 %
8	1.003	1.006	1.009	1.012	1.015	0.30 %	0.60 %	0.89 %	1.19 %	1.49 %
9	1.004	1.008	1.011	1.015	1.019	0.38 %	0.75 %	1.13 %	1.51 %	1.90 %
10	1.005	1.009	1.014	1.019	1.023	0.46 %	0.93 %	1.40 %	1.87 %	2.35 %
11	1.006	1.011	1.017	1.023	1.028	0.56 %	1.13 %	1.70 %	2.27 %	2.85 %
12	1.007	1.013	1.020	1.027	1.034	0.67 %	1.34 %	2.02 %	2.71 %	3.40 %
13	1.008	1.016	1.024	1.032	1.040	0.79 %	1.58 %	2.38 %	3.18 %	4.00 %
14	1.009	1.018	1.028	1.037	1.046	0.91 %	1.83 %	2.76 %	3.70 %	4.65 %
15	1.010	1.021	1.032	1.043	1.054	1.05 %	2.11 %	3.18 %	4.26 %	5.36 %

$$\frac{a}{f^2} \times 10^5 = 56.8524 - 3.02545T + 0.117416T^2 - 2.9543 \times 10^{-3}T^3 + 3.96985 \times 10^{-5}T^4 - 2.11091 \times 10^{-7}T^5 \quad (4)$$

여기서 T 는 물의 온도, f 는 주파수이다. 23 °C의 순수한 물에서 주파수와 초음파 변환기와 표적 사이의 거리 z 에 따른 $\exp(2az)$ 및 감쇠에 의한 상대편차 $[\exp(2az) - 1]$ 의 백분율 값을 표 1과 같다. 표 1에서 보는 바와 같이, 초음파 변환기에서 표적 사이의 거리 z 와 주파수 f 가 증가함에 따라 편차가 증가한다. 주어진 범위 중 $f = 15$ MHz, $z = 5$ mm 일 때의 상대 편차는 5.36 %로 가장 크게 나타났으며, 이 정도의 편차로 미루어 볼 때 물에서의 초음파 감쇠에 의한 영향인 $\exp(2az)$ 의 보정을 무시할 수 없다. 같은 조건에서 감쇠에 의한 상대편

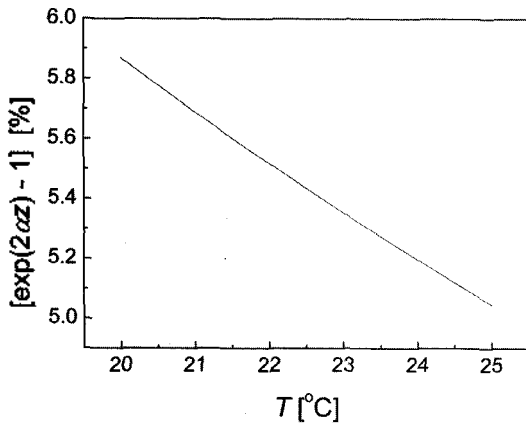


그림 9. 수온 변화에 따른 감쇠율과 보정인자의 상대편차 변화
Fig. 9. The change of the relative difference of the correction factor due to the attenuation effect.

차 $[\exp(2az) - 1]$ 의 온도에 따른 변화는 그림 9와 같다. 그림 9에서 보는 바와 같이 20 °C에서 25 °C 범위의 온도가 변화할 때, 온도가 낮을수록 이 편차가 더 크고 온도가 증가할수록 편차가 줄어든다. 초음파 발진 주파수와 표적의 종류에 따라 수온의 변화가 달라지지만, 최대 1 °C를 넘지는 않는다. 따라서 이러한 상대편차의 변화는 0.2 % 정도로 주파수나 거리에 따른 변화폭 보다 비교적 작다.

물에서의 음속은 다음 식과 같이 수온과 대기압에 의존한다[10].

$$c(P_a, t_w) = 1402.7 + 488t_w - 482t_w^2 + 135t_w^3 + (15.9 + 2.8t_w + 2.4t_w^2)(P_a/100) \quad (5)$$

여기서 $t_w = T/100$ 이고, P_a 는 bar 단위의 대기압이다. 표 2는 기압 0.9 bar에서 1.1 bar 범위, 온도 20 °C에서 26 °C범위에서 물에서의 음속과 23 °C, 1 bar에서의 음속에 대한 상대편차를 계산하여 나타낸 것이다. 표 2에서 보는 바와 같이 기압의 변화에 따른 영향은 거의 무시할 수 있으며, 온도에 따른 영향은 최대 1 °C가 차이가 날 때 약 0.2 % 정도의 상대 편차가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

그림 8의 실험 조건, $f = 10$ MHz, $z = 1$ mm, $T = 23$ °C(실험 당시의 평균 수온), $P_a = 0.98$ bar(실험 당시의 평균기압)에 대해, 표 1과 표 2로부터 $\exp(2az) \approx 1.005$, $c \approx 1,491.3$ m/s 이다. 중력가속도 $g \approx 9.81$ m/s를 식 (2)에 대입하여 음향파위를 구하면, $P_0 \approx$

표 2. 기압 및 온도에 따른 음속 보정값 및 상대편차

Table 2. Correction values and their relative differences for the ambient pressure and the water temperature.

T	c(P _a , T) (m/s)					(C _{ref} - c(P _a , T))/C _{ref} (%)				
	at P _a (bar)					at P _a (bar)				
	0.9	0.95	1	1.05	1.1	0.9	0.95	1	1.05	1.1
20	1482.2	1482.3	1482.3	1482.3	1482.3	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
21	1485.3	1485.3	1485.3	1485.3	1485.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
22	1488.3	1488.3	1488.3	1488.3	1488.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
23	1491.2	1491.2	1491.3	1491.3	1491.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	1494.1	1494.1	1494.1	1494.1	1494.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
25	1496.8	1496.8	1496.9	1496.9	1496.9	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4
26	1499.5	1499.5	1499.5	1499.5	1499.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6

표 3. 추세선 맞춤 결과를 이용한 초음파 파워 결정 예

Table 3. Examples of the ultrasonic power determination by using the curve fitting results.

n	t ₀ [s]	a ₁ [mg/s]	b ₁ [mg]	y ₁ (t) [mg]	a ₂ [mg/s]	b ₂ [mg]	y ₂ (t) [mg]	y ₂ (t)-y ₁ (t) [mg]	F _i [mg · m/s ²]	F ₀
1	13	0.0026	0.5641	0.598	0.0074	1.3298	1.426	0.828	8.115	12.07
2	33	0.0014	0.6635	0.710	0.0083	1.2656	1.540	0.830	8.132	12.10
3	53	0.0024	0.7078	0.835	0.0097	1.1649	1.679	0.844	8.271	12.31
4	73	0.0036	0.7437	1.007	0.0114	1.0233	1.856	0.849	8.320	12.38
5	93	0.0055	0.7057	1.217	0.0115	0.9999	2.069	0.852	8.352	12.43

12.07 mW 이다.

그림 10은 초음파를 5회에 걸쳐 반복해서 10 초 간격으로 가했을 때의 저울 지시값의 시간에 따른 변화를 기록한 것이다. 그림 8에서 보는 바와 같이 5 개의 y₁과 5 개의 y₂가 존재하며, 이 결과로부터 5 개의 음향파워 값을 구할 수 있다.

표 3은 그림 10의 5 개의 y₁과 y₂의 추세선 맞춤 결과를 이용하여, 식 (3)으로 z = 0에서의 음향파워를 결정하는 것을 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 5 번의 y₁과 y₂의 기울기 a₁과 a₂ 및 절편 b₁과 b₂는 매번 달라지고 있으나, 방사함에 의한 저울 지시값의 변화 m = y₂(t) - y₁(t)는 평균이 0.841 mg, 5 회 반복 측정에 의한 표준 편차는 σ = 0.011 mg를 갖는다. 식 (2)를 이용

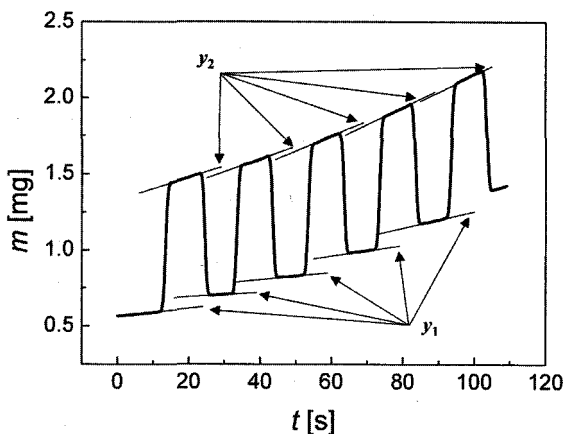


그림 10. 흡음형 표적에 CW 초음파를 5 회 가했을 때 전자저울 지시 값의 시간에 따른 변화

Fig. 10. The time variation of the electro-balance indication for 5th times incidences of the CW ultrasonic irradiation to an absorbing target.

하여 산정한, z = 0에서의 평균 음향파워는 12.26 mW 이고, 5 회 반복 측정에 의한 표준 편차는 0.17 mW 이며, 상대 표준 편차는 약 1.3 % 정도이다.

측정시스템의 성능을 평가하기 위하여 동일한 초음파 변환기로 독일표준국인 PTB의 측정결과와 상호 비교하였다. 비교 측정에 사용된 변환기는 앞서 기술한 명목주파수가 1 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz인 4 종을 사용하였다. 표 4는 이들 초음파 변환기를 사용하여 인가 전압에 따른 음향파워를 측정한 두 기관의 교정 결과를 보여주고 있다. 여기서 F_i 은 상대 비교의 기준 음향파워로 PTB에서 측정된 음향파워 값이고, F₀은 같은 초음파 변환기에 대해 본 측정 시스템으로 측정한 결과이다. 그림 11은 상대 편차 (F_i - F₀)/F_i 을 백분율로 환산하여 F_i 을 x-축으로 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 전 주파수 범위에 걸쳐 측정 결과는 기준 값을 중심으로 ± 5 % 이내에서 분포하는 것으로 나타났다.

그림 11의 기준값 F₀ 은 초음파 변환기와 표적 사이의 거리를 변화시키면서 약 3 - 5회 측정하고 거리에 따른 변화를 1차 함수 추세선 맞춤하여, z = 0 지점에서의 값을 추정하는 방식으로 구한 결과이며, 본 측정 시스템으로 구한 결과 F₀ 은 거리에 따른 감쇠 효과를 이론적으로 보상하여 구한 결과이다. 보다 정확한 측정을 위해서는 계통적 요인에서 기인되는 영향에 대한 분석이 필요하다. 이러한 계통적 요인으로는 초음파 파워 측정에 사용되는 흡음형 표적의 결함 즉, 표적에서의 미소 반사 및 투과로 인해 초음파를 완전 흡수하지 못하는 문제 [11], 식 (1)에서의 평면파 가정에 대하여 회절손실에 의

표 4. 기준값에 대한 초음파 파워 측정 결과 비교
Table 4. Comparison of the measurement results with the reference values.

f (MHz)	Nominal Power (mW)	V (V)	P _r (mW)	P _m (mW)	Difference	
					P _r -P _m (mW)	(P _r -P _m)/P _r
1	100	2.52	101.5	99.1	2.4	0.024
	500	5.77	515.0	495.8	19.2	0.037
	1000	8.31	1038.0	999.7	38.3	0.037
	10000	29.06	9650.0	10110.7	-460.7	-0.048
5	100	2.08	100.2	98.5	1.7	0.017
	500	4.66	502.0	488.5	13.5	0.027
	1000	6.71	1039.0	1015.8	23.2	0.022
	10000	20.46	9990.0	10143.6	-153.6	-0.015
10	10	4.60	11.0	10.9	0.1	0.012
	50	9.85	49.8	50.3	-0.5	-0.009
	100	14.02	101.2	102.0	-0.8	-0.008
15	10	1.10	10.5	10.4	0.1	0.006
	100	3.51	102.4	100.7	1.7	0.017
	500	8.13	509.0	507.7	1.3	0.003

한 영향[12], 고출력 초음파에서의 동공 (cavitation) 발생 및 유체 흐름 발생, 비선형적 부력 변화 거동에 대한 선형 이론의 적용[13] 등에 의한 영향을 들 수 있다.

비록 상기와 같은 영향에 대한 이론적 보상 모델이 제시된 경우라 할지라도, 측정 결과의 일치성을 위해서는 표준 규격으로 인정되어야 한다. 현재 회절 손실에 의한 영향의 보상에 대한 모델은 국제표준화 규격에 포함 여부가 검토되고 있다. 고출력 초음파에 의한 동공 발생과 이로 인한 유체의 흐름 발생에 대한 이론적 보상 모델은 아직 제안된 것이 없으나, 최근에 동공의 발생량을 측정할 수 있는 센서가 개발되어 시험 중에 있다[14]. 표적 결합에 대한 보상 모델은 실험을 통한 증명이 남아있는

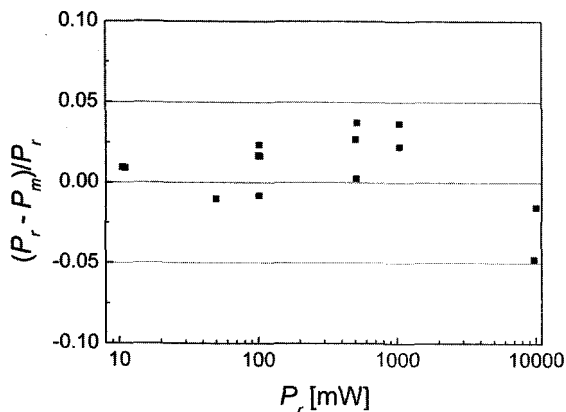


그림 11. 기준값에 대한 측정 결과의 상대 편차
Fig. 11. The relative difference of the measurement results to the reference values.

상태이다. 이를 위해서는 미소 반사 재료에 대한 반사계수 측정 기술과 고 흡음 재료의 감쇠계수 측정 기술의 개발이 필요하다. 이를 위해서는 -100 dB 정도의 신호를 잡음에 의한 왜곡이 없이 관찰할 수 있는 정밀 펄스 잔향 기법 (precise pulse echo technique)의 개발이 요구된다[15].

V. 결론

본 논문에서는 의료용 초음파 진단기 및 치료기에 사용되는 주파수 대역과 음향파워 범위를 대상으로 초음파 음장 하에서 흡음용 표적에 가해진 방사 힘에 비례하는 등가질량을 전자저울로 측정하여 음향파워를 결정하는 정밀 측정 시스템 구성과 성능 평가에 대해 제시하였다. 동일한 초음파 변환기를 대상으로 본 논문에서 구성한 시스템으로 측정한 결과와 독일표준국의 측정결과를 상호 비교한 결과 ± 5 % 이내에서 일치하는 것으로 나타났다.

방사힘 측정 원리에 의한 초음파 파워 측정의 불확도를 줄이기 위해서는 측정에 사용되는 흡음용 표적의 결합을 최소화하여야 한다. 이를 위해서는 표적의 음향 성능을 보다 정밀하게 측정할 수 있는 기술과 초음파를 완전 흡수할 수 있는 표적 제작 기술이 요구되며, 앞으로 이에 대한 연구를 계속 수행해 나갈 것이다.

참고 문헌

1. M. J. Herry, "Experimental studies on acoustic radiation pressure", J. Acoust. Soc. Am., 27 (5) 891-896, 1955.
2. International Electrotechnical Commission, IEC 61102, "Measurement and characterisation of ultrasonic fields using hydrophones in the frequency 0.5 MHz to 15 MHz", 1994.
3. M.E. Haran and H.F. Stewart, "Comparison of an acousto-optic and a radiation force methods of measuring ultrasonic power", J. Acoust. Soc. Am., 57 (6), 1436-1440, 1975.
4. J. Zieniuk, R. C. Chivers, "Measurement of ultrasonic exposure with radiation force and thermal methods", Ultrasonics, 14, 161, 1976.
5. 김용태, 조문재, 윤용현, 부유천, "초음파 조사에 의한 두부의 열 감도," 한국음향학회지, 23 (7), 503-513, 2004.
6. International Electrotechnical Commission, IEC 61161, "Ultrasonic power measurement in liquids by radiation force balance method in the frequency 0.5

MHz to 25 MHz", 1994.

7. 윤용현, 김용태, 조문재, 김호철, "측정불확도 평가결과를 이용한 초음파 파워 측정용 전자저울의 기능설정 최적화," 2003년도 한국음향학회 학술발표대회 논문집, 22 (1s), 221-224, 2003.
8. 김용태, 이동봉, 조문재, 정성수, 정완섭, "진단 및 치료수준의 초음파 파워 정밀 측정 기법," 2002년도 한국음향학회 추계학술발표대회 논문집, 21(2s), 119-124, 2002.
9. J. M. M. Pinkerton, "The absorption of ultrasonic waves in liquids and its relation to molecular constitution", Proc. Phy. Soc., 62, 129-141, 1949.
10. L. E. Kinsler, et al, *Fundamentals of Acoustics*, (4th ed. John Wiley & Sons, New York, 2000), p. 121.
11. M. J. Jho, Y. T. Kim, Y. H. Yun, and S. J. Suh, "Primary measurement of ultrasonic power at the Korea Research Institute of Standards and Science," Proceedings of ICA2004, 1, 665~666, 2004.
12. K. Beissner, "Acoustic radiation pressure in the near field," J. Sound & Vib. 93 (4) 537-548, 1984.
13. T. Kikuchi and S. Sato, "Research on ultrasonic standards at ETL -Ultrasonic power measurement system by using radiation force method-, Technical report of IEICE, US 2000-9 (2000-5), 9-16, 2000.
14. M. Hodnett and B. Zegiri, "A detector for monitoring the onset of cavitation during therapy-level measurement of ultrasonic power," Book of Abstracts of Advanced Metrology for Ultrasound in Medicine, April 2004 Teddington, UK.
15. 부유천, 김용태, 조문재, 김민근, 김호철, "고체 시료의 초음파 감쇠계수 측정 시스템 개발," 2005년도 한국음향학회 학술발표대회 논문집, 24 (1s), 181~184, 2005.

• 정성수 (Sung Soo Jung)

한국음향학회 18권 4호 참조

저자 약력

• 조문재 (Moon Jae Jho)

한국음향학회지 13권 1호 참조

• 김용태 (Yong Tae Kim)



1986년 2월: 한국외국어대학교 물리학과 (이학사)
 1988년 2월: 한국외국어대학교 물리학과 (이학석사)
 1997년 8월: 한국외국어대학교 물리학과 (이학박사)
 2004년 4월~현재: IEC, TC87 (Ultrasonics), WG8 (Field characterization) member
 2001년~현재: IEC TC87 (Ultrasonics) 국내전문위원
 1997년 8월~현재: 한국표준과학연구원

*주관심분야: 의료용 초음파, 초음파 표준, 초음파 음향해석

• 윤용현 (Yong Hyeon Yun)



1999년 2월: 서울산업대학교 전자공학과 (공학사)
 2002년 8월: 연세대학교 의공학과 (공학석사)
 2004년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 (박사과정)
 1999년 2월~현재: 한국표준과학연구원
 *주관심분야: 생체신호처리, 의료용 초음파, 초음파 측정