

## 밀리와트 영역의 초음파 파워 정밀 측정

### Precision Measurement of Ultrasonic Power the Milliwatt Range

조 문 재\*, 황 철 호\*, 서 상 준\*, 차 일 환\*\*

(Moon Jae Jho, Cheol Ho Hwang, Sang Joon Suh, Il-Whan Cha)

#### 요 약

초음파를 완전 반사시킬 수 있는 반사용 target과 완전 흡수시킬 수 있는 흡수용 target을 이용하여, 이들 target에 가해진 방사음압을 전자저울로 측정하고 이로부터 밀리와트 영역의 초음파 파워를 결정할 수 있는 시스템을 구성하였다. 이 시스템 구성의 타당성 검토를 위해 완전 반사용 target과 완전 흡수용 target으로 구한 초음파 파워의 크기를 측정하였으며, 측정 시스템의 계통 오차 및 재현성 등에 대해 고찰하였다. 두가지 target을 각기 사용하여 측정한 초음파 파워의 차이는 2%의 상대 오차 이내에서 잘 일치하며, 시스템의 재현성은 10mW 이상의 초음파 파워에 대한 표준편차가 2% 이하였다.

#### ABSTRACT

An ultrasonic power measurement system in milliwatt range was constructed. The ultrasonic power can be determined by measuring the radiation pressure on a target using self-compensating microbalance. Measurement was performed using a perfect reflector and a perfect absorber. In order to check the feasibility of the system, the ultrasonic power for the two targets was measured. Also, the systematic measurement errors and the reproducibility were examined. The relative error between two targets is proved to be within 2%. Also when the ultrasonic power range is larger than 10mW, the standard deviation for repeated measurement becomes smaller than  $\pm 2\%$ .

#### I. 서 론

초음파가 산업용, 군사용, 의료용 등 다양한

걸쳐 폭 넓게 사용됨에 따라 초음파 변환기의 정확한 특성을 파악하는 것은 사용자나 환자에 국한된 문제뿐만 아니라 초음파 장비를 생산하는 산업계의 최대 관심사이다.

초음파 변환기에서 발생된 초음파 음장의 음향특성을 완전히 나타내기 위해서는 두가지 양을 필요로

\*한국표준연구소 융합·진동연구실

\*\*연세대학교 전자공학과

하는데 하나는 초음파 파워이고 다른 하나는 저항특성이다. 특히 초음파가 의료기에 사용됨에 따라 시간 평균된 파워 측정이 매우 중요하게 되었다. 초음파가 치료용으로 사용될 때 출력파워가 너무 크게 되면 인체에 손상을 입힐 수 있으며 너무 작은 경우에는 충분한 치료효과를 기대할 수 없으므로 적절한 출력 파워를 유지하여야 한다.

초음파 변환기로부터 방사된 총 음향파워의 측정 은 target에 가해진 방사음압을 측정하여 파워를 결정하는 방법[1], 교정된 하이드로폰 (hydrophone) 을 사용하여 초음파 음장내를 주사하여 결정하는 방법[2], 광의 회절을 이용하는 방법[3], 열량계를 이용하는 방법[4] 등이 있다. 이들 중에서 방사음압을 측정하여 파워를 결정하는 방법은 근거리 음장과 원거리 음장에 무관하게 임의의 위치에서 측정할 수 있을 뿐만 아니라 발생원으로부터 방사된 음이 통과하는 평면상의 여러 위치에서의 음압을 측정하여 적분할 필요가 없고, 측정장비를 교정하거나 조정하기에 매우 용이하다는 장점이 있다.

본 연구에서는 초음파를 완전 반사시킬 수 있는 반사용 target과 완전 흡수시킬 수 있는 흡음용 target 을 이용하여, 이들 target에 가해진 방사음압을 전자저울로 측정하고 이로부터 밀리와트 영역의 초음파 파워를 측정할 수 있는 장치를 제작하여 이의 특성을 조사 분석하였다.

## II. 전자저울을 이용한 초음파 파워 측정원리

두 매질의 경계면에 초음파가 가해져서 두 매질의 에너지 밀도가 다르게 되면 에너지 밀도가 감소하는 방향으로 경계면에 힘이 가해진다. 이때 가해지는 단위 면적당의 힘을 방사음압이라 한다. 가정 소음원인 경우에는 음향 파워를 측정하기 위해서 음원을 둘러싸는 구면 혹은 직육면체 형의 표면을 가상하여 그 표면상의 음압을 측정한다[5]. 그러나 초음파의 경우에는 저항성이 좁아서 소리의 세기가 집중되기 때문에 초음파가 진행하는 경로상의 방사음압을 측정하여 파워를 결정하게 된다. 두 매질의 경계면에 가해지는 방사음압은 두 매질 사이의 음향에너지 밀도차와 같다. 따라서 방사음압은 동일한 크기의 음압이 가해지더라도 경계면상의 반사계수에 따라 달라지게 된다. 초음파가 경계면 상에서 완전 흡수(R=0) 되거나 완전반사 (R=1) 된다면 초음파 파워는 경계면에 가해진 시간 평균된 힘과 전파속도에 의해 식(1)과 같이 구할 수 있다[6].

$$W = P_{rad} \cdot S \cdot c = F_{rad} \cdot c \quad (R=0인\ 경우) \quad (1-a)$$

$$W = \frac{P_{rad} \cdot S \cdot c}{2} = \frac{F_{rad} \cdot c}{2} \quad (R=1인\ 경우) \quad (1-b)$$

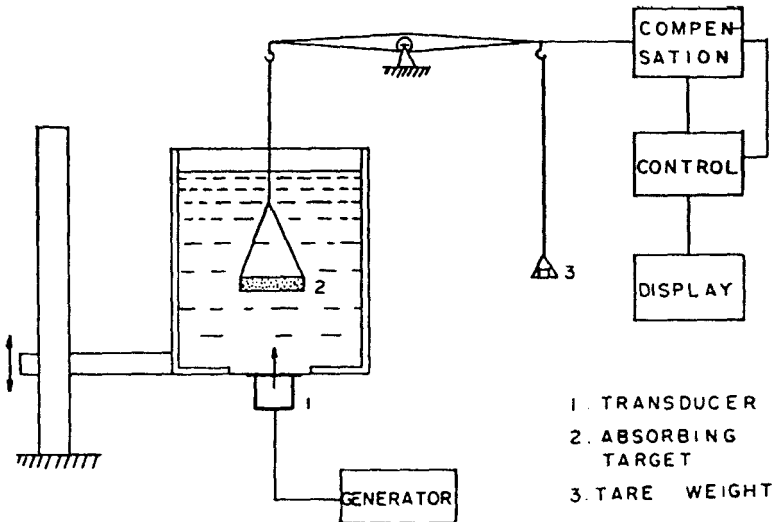


Fig.1 Radiation force balance system with absorbing target.

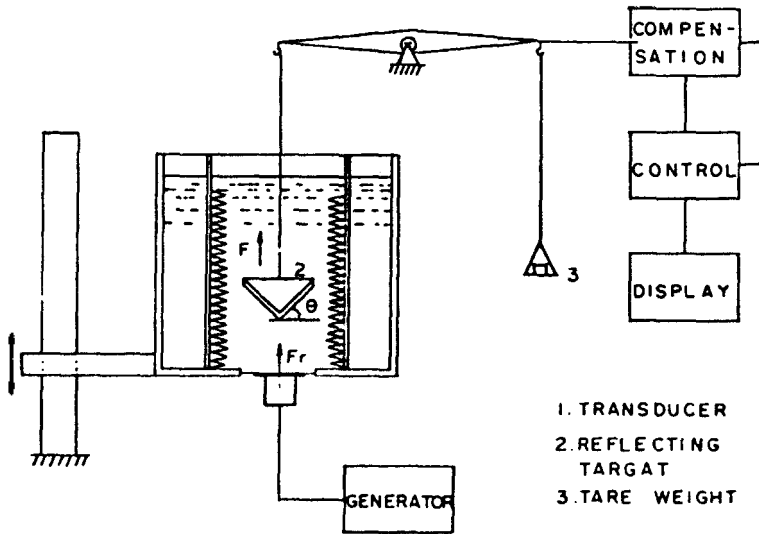


Fig.2 Radiation force balance system with reflecting target.

여기서,  $P_{rad}$  : 방사음압,  
 $F_{rad}$  : 경계면상에 가해진 시간 평균된 힘,  
 $S$  : 초음파 변환기로부터 나오는 빔 폭의 가상면적,  
 $c$  : 초음파의 전파속도,  
 $R$  : 반사계수  
 를 나타낸다.

그림 1과 그림 2는 전자저울을 이용한 밀리와트 범위의 초음파 파워 측정기법의 원리를 보여준다. 그림 1은 흡음용 target을 사용한 경우로서 그림에 나타난 바와 같이 초음파 변환기는 아래쪽에서 윗쪽을 향하여 초음파를 방사할 수 있도록 놓여 있으며 흡음용 target은 가는 금속줄로 저울 arm에 연결되어 있다. 초음파 변환기로부터 방사된 빔은 흡음용 target에 의해 차단되며, 이 때 target에 힘이 가해지게 된다. 이 힘은 전자저울에 의해 측정된 질량 변화량에 중력 가속도  $g(=9.81 \text{ m/sec}^2)$ 를 곱한 값과 같으므로 식(1-a)를 이용하여 초음파 파워를 구할 수 있다.

완전 흡음용 target의 경우 초음파 파워는 다음과 같다.

$$W = F_{rad} \cdot c = m \cdot g \cdot c \quad (2)$$

여기서  $m$ 은 방사음압에 대한 등가질량 (equivalent mass),  $g$ 는 중력가속도를 나타내며  $c$ 는 초음파의 전파속도로서 23°C 순수한 물에서 1491m/sec 이다.

그림 2는 반사용 target을 사용한 경우로서 측정방법은 흡음용 target의 경우와 동일하며, 벽면으로부터의 반사영향을 배제시키기 위해 그림과 같이 벽면에 흡음재를 설치하였다. 초음파 음장하에 있는 원뿔 모양의 target의 경사각이  $\theta$ 라면 target은 연직방향으로 작용하는 힘  $F = 2F_{rad} \cos^2 \theta$ 를 받게 된다. 따라서 target이 완전 반사체라면 다음식과 같이 초음파 파워를 구할 수 있다.

$$W = \frac{F \cdot c}{2 \cos^2 \theta} = \frac{m \cdot g \cdot c}{2 \cos^2 \theta} \quad (3)$$

여기서,  $\theta$ 는 target의 경사면이 수평선과 이루는 각 또는 target면에 대한 법선방향과 파의 진행방향 사이의 각도를 나타내며 만약  $\theta$ 가 45°라면 초음파 파워는 (2)식과 동일한 것을 알 수 있다.

### III. 초음파 파워 측정장치 구성

그림 3은 본 연구에서 구성한 초음파 파워 측정 장치를 도해적으로 나타내고 있다. 그림에 나타난

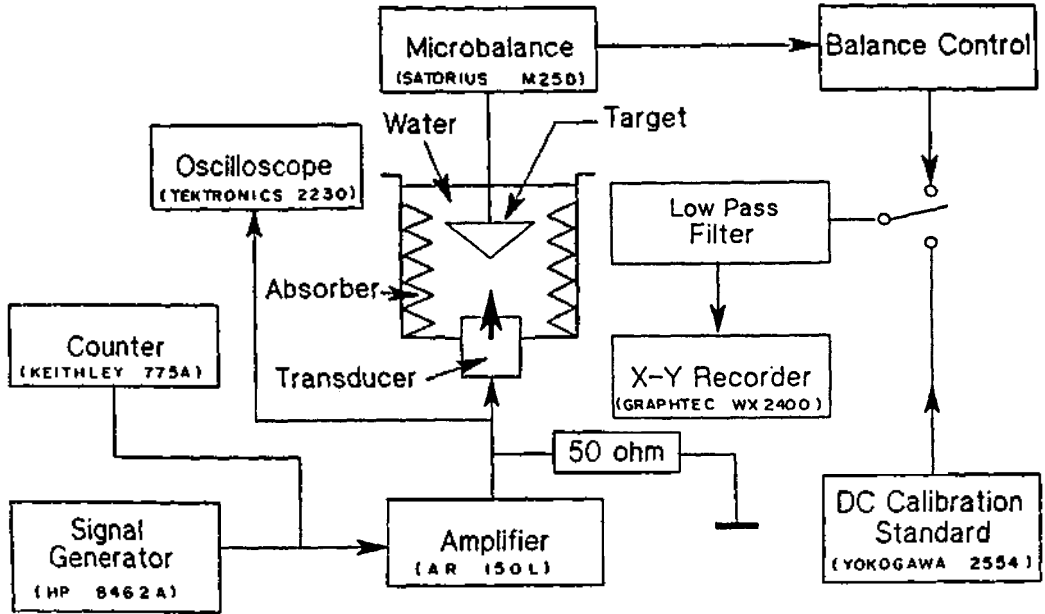


Fig.3. Block diagram of the ultrasonic power measurement system using an electro-balance.

바와 같이 이 측정시스템은 크게 초음파 변환기에 신호를 가해주는 구동부와 변환기로부터 방사된 방사음압을 측정할 수 있는 계측부로 구성되어 있다. 구동부는 신호발생기와 신호증폭용 전력증폭기 (power amplifier), 주파수 계수기, 변환기에 인가되는 전압을 측정하기 위한 오실로스코프 및 rms 전압 계로 이루어졌다.

전력증폭기와 변환기 사이의 50Ω 병렬 저항은 최적 파워전달을 위한 임피던스 정합용으로 사용된다. 신호발생기로부터 나온 정현파 신호는 증폭기를 거쳐 초음파 변환기에 인가되며 변환기는 수조안에서 연직방향으로 초음파를 방사한다. 초음파 음장은 self-compensating 전자저울에 달려 있는 target에 부딪치며 이 때 target에 가해진 방사음압의 효과는 전자저울에 의해 DC 전압으로 변환되어 X-Y 기록기에 기록된다. 전자저울은 정밀 분동에 의해 교정되며 X-Y 기록기의 Y 입력은 표준 DC 전압공급기에 의해 교정된다. 초음파 변환기에 인가되는 초기의 정현파 신호는 신호발생기와 전력증폭기 사이에 있는 스위치에 의해 순간적으로 가해진다. 따라서 target은 순간적으로 힘을 받게 되므로 안정된 상태에 이르기까지 상하진동을 하게 된다. 이와 같은

ringing 현상을 최대한으로 줄이고 전자저울의 전기적 잡음 및 환경영향에 기인한 랜덤 잡음을 줄이기 위해 X-Y 기록기 앞단에 저역통과 필터를 삽입하였다.

수조는 약 2650 cm (직경 : 150 mm, 높이 : 150 mm)의 체적을 갖는 원통형으로 아크릴 파이프를 사용하여 제작하였다. 수조 윗 부분은 물 표면에서의 대류 (convection current) 현상으로부터 야기되는 신호의 drift를 최소화하기 위해 target을 전자저울에 연결하기 위한 금속 줄이 지나가는 구멍(직경 : 10 mm)을 제외하고는 모든 부분을 밀폐시켰다. 수조는 길이 150 mm의 새개의 다리로 지지되어 있으며, 다리 아래 부분에는 수조의 평형을 맞추기 위해 높이 조절용 나사를 삽입하였다. 이 수조 아래부분 정 중앙에 초음파 변환기의 방사면을 위로 향해 장착할 수 있도록 하였다.

수조는 상하로 움직일 수 있는 이송기 위에 놓여진다. 이송기의 이동거리는 약 150 mm 정도이다. 이와 같이 이송기 위에 수조를 설치한 이유는 초음파 변환기와 target 사이의 거리를 변화시키기 위한 것으로 1/100 mm 정밀도를 갖는 digital caliper (Mitatoyo 500)에 의해 target과 변환기 사이의 거리

를 측정하도록 하였다. 외부의 공기 유동이나 온도변화에 따른 영향을 최소화하기 위해 수조는 직육면체형 아크릴 상자로, 전자저울과 상자사이는 알미늄 파이프를 밀폐시켰다.

측정시스템의 구성중 가장 중요한 것은 target 제작이며 측정 정밀도는 사용된 target의 음향특성에 의해 좌우된다. 그림 4는 제작한 반사용 target을 보여준다.

본 연구에서는 비중이 1.05인 high-impact polystyrene 프라스틱에 발포제를 혼합하여, 경사각이 45°, 직경이 60 mm, 두께가 7.0 mm인 원뿔형 target을 제작 하였다. 또한 target 표면에서의 음향반사효과를 높이기 위해 약 10  $\mu\text{m}$  두께의 니켈도금을 하였다.

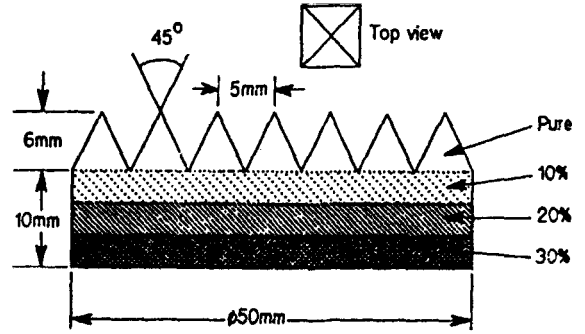


그림 5. Wedge-type rubber absorber.

(Mill-Ro+ Mill-Q Labo)로 만들었으며 물 탱크내에 히터를 설치하여 3시간 정도 끓이면서 진공펌프를 이용하여 물속에 녹아있는 가스와 기포를 제거하였다. 또한 자연적으로 용해되는 기포에 의한 영향을 배제하기 위해 12시간 주기로 물을 교환하여 실험하였다.

#### IV. 초음파 파워 측정장치의 성능평가

본 연구에서 구성한 초음파 파워 측정장치의 성능평가는 방대한 양의 실험데이터를 추적함으로써 다음 세 가지 사항에 대해 고찰하였다. 측정은 19.9°C에서 23°C 사이의 온도에서 행하였으며 세 종류의 PZT 압전형 초음파 변환기 (1 MHz, 2MHz, 4MHz)를 이용하여 측정장치의 성능을 분석하였다.

##### 1) Target에 따른 특성분석

본 연구에서 제시하는 초음파 파워측정은 초음파를 100% 반사시킬 수 있는 경우와 100% 흡수시킬 수 있는 이상적인 두 가지 경우를 가정하여 이루어진다. 따라서 초음파 파워 측정에 사용되는 target은 이 두가지 경우에 근접하도록 설계되어야 하며, target의 음향특성 (흡음, 반사계수)을 실험적으로 정확하게 규명하는 것이 요구된다. 그러나 target의 음향특성 측정과 측정오차가 작기 때문에 target의 음향특성을 정확히 규명하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 제작된 두 가지 target을 이용하여 초음파 파워를 각기 측정 분석함으로써 target에 따른 상대적인 차이점에 대해 고찰하였다.

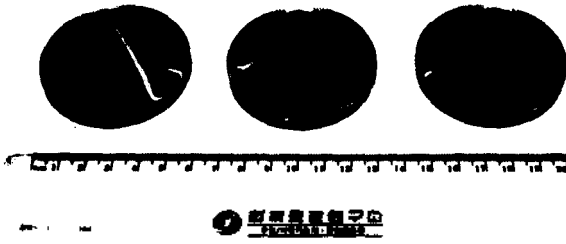


Fig.4. Photography of the cone-type reflector.

그림 5는 본 연구에서 제작한 흡음용 target의 구조를 보여준다. 그림에 나타난 바와 같이 표면반사를 최대한 줄이기 위해 쐐기형 target을 설계하였으며 재질은 천연고무로 하였다. 고무의 압출율과 밀도 변화에 따른 영향을 배제하고 흡음특성을 향상시키기 위해 약 0.1 mm의 직경을 가진 유리가루를 그린과 같은 비율로 고무와 혼합하여 target을 제작하였다. 제작된 흡음용 target은 직경 60 mm, 두께 10 mm, 쐐기사이의 거리가 5 mm로 되어 있으며, 각도가 45°이며 순수한 고무로 되어 있는 쐐기의 길이가 6 mm이다.

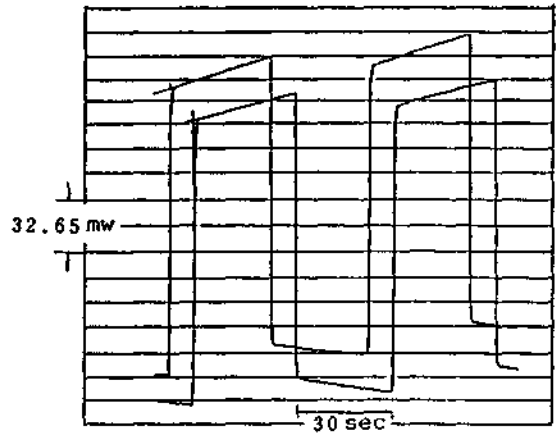
측정정밀도를 향상시키기 위해 측정에 사용된 볼류 18 M $\Omega$ cm의 비 저항치를 갖는 초순수 제조장치

그림 6은 흡음용 target과 반사용 target에 대해, 초음파 변환기에 정현신호를 30초 간격으로 인가한 경우의 전자저울의 출력을 X-Y 기록기로 그린 질량 변화량 곡선이다. 측정은 4MHz 초음파 변환기를 사용하여 행하였으며, 이 때 물의 온도는 21.2°C이다. 그림에 나타난 것과 같이 흡음용 target을 사용한 경우, 반사용 target과는 달리 초음파 변환기에 정현신호를 인가한 후 시간이 지남에 따라 질량변화량 곡선이 서서히 증가하는 특성을 볼 수 있다. 이는 target 내부에서 음향 에너지가 열 에너지로 변환되면서 야기되는 target의 부피증가 즉, 부력증가에 의한 것이다. 초음파 파워는 초음파 방사 전후 상태의 질량 변화량에 중력 가속도와 매질의 전파속도를 곱하여 얻을 수 있다. 그림에서 흡음용 target의 경우 y축의 눈금 간격은 두 칸이 약 32.65 mW에 해당되며 네 개 데이터의 평균치는 180 mW로 얻어진다. 반사용 target의 경우에는 눈금 두 칸이 약 32.87 mW에 해당하며 데이터 평균치는 약 183 mW이다. 여기에서 눈금 두 칸에 해당되는 초음파 파워가 다른 것은 측정시 온도차에 기인된 것이다. 반사용 target과 흡음용 target을 사용한 경우의 초음파 파워의 차이는 3 mW로서 이의 상대오차는 2% 이내로 주어진다. 이상의 결과로부터 본 연구에서 제작한 두 가지 target을 각기 사용하여 측정된 파워는 상대적으로 잘 일치하는 알 수 있다. 실제적으로 두 가지 target 모두 이상적인 target과 편차가 있을 것으로 판단되며, target의 성능평가는 별도의 실험 방법으로 하거나 다른 연구기관이나 국제상호 비교 측정에 의해 모색하는 것이 바람직하다고 생각된다.

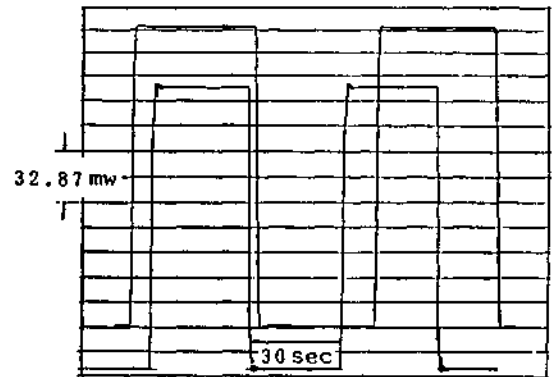
2) Target 거리에 따른 변화

유체에 초음파가 진행되면 streaming 효과가 발생하는데 이러한 streaming 효과는 초음파 음장에 영향을 미치기 때문에 파워 측정시에 매우 중요한 요소로서 작용한다. Streaming 효과를 줄이기 위해서는 target과 초음파 변환기 사이의 거리가 가능한 짧아야 한다[7]. 그림 7은 초음파 변환기와 target 사이의 거리를 1 mm, 23 mm, 45 mm로 변환시키면서 전자저울의 출력을 X-Y 기록기로 그린 질량

변화량 곡선을 나타낸다.



(a) absorbing target



(b) reflecting target

Fig.6. Variation in time of the ultrasonic power measured with two different targets.

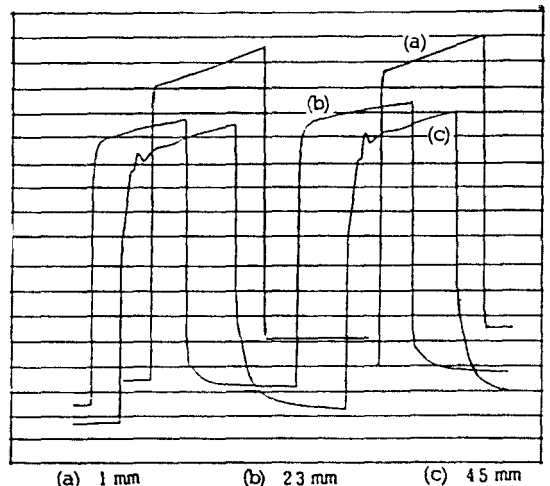


Fig.7. Variation of ultrasonic power under different distance from transducer to target

밀리와트 영역의 초음파 파워 정밀 측정

그림에 나타난 바와 같이 변환기와 target 사이의 거리가 증가할수록 streaming 효과에 의해 초음파 파워가 감소할 뿐만 아니라 폭선이 왜곡특성을 나타내기 때문에 정밀측정이 곤란하게 된다. 따라서 본 연구에서는 초음파 변환기와 target 사이의 거리를 항상 1 mm로 유지하였다.

Streaming 현상을 제거하기 위해서는 target과 초음파 변환기 사이에 얇은 foil (= 10 $\mu$ m)을 사용하고, foil에 의한 영향을 고려하여 보정하여야 한다 [8]. 이에 대한 연구는 앞으로 계속 수행할 것이다.

3) 측정오차

본 연구에서 사용한 전자저울은 1  $\mu$ g에서 100mg 까지 측정이 가능하기 때문에 약 15  $\mu$ 에서 1.5 W의 초음파 파워를 측정할 수 있다. 그러나 외부의 진동이나 공기의 유동, 온도변화, 물 표면에서의 증발 등으로 인해 측정조건이나 측정 환경이 시간에 따라 변화하기 때문에 측정오차를 유발하게 된다 [7]. 그림 8은 흡음용 target을 전자저울에 연결한 후 초음파 변환기를 구동하지 않은 상태에서 10분 동안 시간에 따른 질량 변화량을 측정한 결과를 나타낸 것이다.

그림에 나타난 바와 같이 전자저울의 출력치는 시간에 따라 불규칙하게 변화한다. 전자저울의 출력치는 10분 동안 최대 44  $\mu$ g까지 변화하였으며, 이 변화량은 0.65 mW의 초음파 파워에 해당된다. 초음파 파워는 초음파 방사전과 방사후의 짧은 시간 동안의 질량 변화량을 측정하여 결정하기 때문에 위에서 언급한 0.65 mW 이내의 출력측정도 가능하지만 초음파 파워가 적을수록 오차는 커지게 된다.

낮은 파워에서 측정시스템의 성능을 알아보기 위해 약 0.6 mW의 초음파 파워를 발생시켜 전자저울의 출력치 변화량을 측정하였다. 그림 9는 온도 22.1 $^{\circ}$ C에서 흡음용 target과 4 MHz 초음파 변환기를 사용하여, 초음파 변환기를 1분 간격으로 5회 작동시킬 때 측정된 질량 변화량과 출력치 결과이다.

그림에 나타난 바와 같이 측정과정이 원래가 매우 불규칙하며, 흡음용 target을 사용하는 경우에는 초음파방사가 진행되는 동안에 target 내부에서 발생하는 thermal effect로 말미암아 질량 변화량이 증가

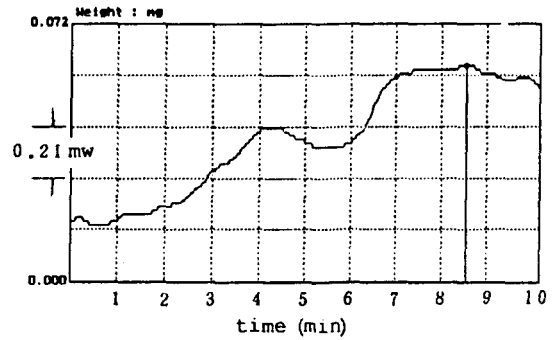


Fig.8. Variation in time of the electrobalance output.

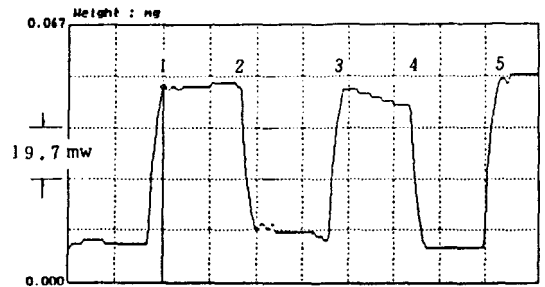


Fig.9. Electro-balance output from low voltage signal applied for 4.0 MHz transducer.

하는 추세를 나타내야 한다. 그러나 세번째에서 네번째 사이에서는 오히려 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이는 흡음용 target 내부에서 thermal effect에 의해 부력이 증가하는 속도보다 측정조건이나 측정 환경에 따라 야기되는 질량변화량이 크기 때문에 발생하는 현상으로 볼 수 있다. 측정 데이터 중에서 출력레벨이 가장 큰 것은 다섯번째로서 0.65 mW, 가장 작은 레벨은 두번째로서 0.57 mW이다. 다섯개 데이터 평균 초음파 출력은 0.59 mW이며, 약 1.34%의 상대오차를 나타낸다. 따라서 1 mW 이하의 초음파 파워를 정밀하게 측정하기 위해서는 외부 진동으로부터 측정시스템을 차폐시켜야 하며, 물 표면에서의 증발 및 온도변화에 따라 발생하는 잡음의 영향을 최소화하기 위해 가능한 한 target의 부피를 줄여야 한다.

측정시스템의 성능평가에 있어서 중요한 사항중의 하나인 재현성 분석은 다음 네가지 경우에 대한 반복측정 결과를 비교함으로써 검토하였다.

(a) 전력 증폭기와 신호 발생기의 수 전원을 끄고

수분이 경과한 후에 다시 같은 전압을 초음파 변환기에 가했을 때의 질량변화.

- (b) 임의의 초음파 음장하에서 인위적인 충격을 측정시스템에 가한 다음 수 분후에 측정했을 때, 충격을 가하기 전 상태에 대한 질량변화.
- (c) 온도에 따른 초음파 파워변화.
- (d) Target을 제거하였다가 다시 원위치 시켰을 때의 질량변화.

이상과 같은 네가지 경우에 대해 5회씩 측정한 결과 10 mW 초음파 파워에 대해 1.98%, 100 mW에 대해 1.68%의 표준편차를 얻었다. 이와 같은 오차를 유발시키는 원인은 크게 기계적인 요인과 전기적인 요인으로 나눌 수 있다. 기계적인 요인으로는 target과 물과의 경계에서 발생하는 접착력 (adhesive force)과 target의 부력변화를 들 수 있으며 전기적인 요인으로는 전자저울과 X-Y 기록기를 비롯한 전자장비의 시스템 오차와 초음파 변환기에 인가하는 전압을 동일한 크기로 가하는 문제들을 들 수 있다.

측정시스템의 재통오차는 target에 기인한 오차와 전자저울 및 X-Y 기록기의 교정오차로 나타낼 수 있다. Target에 기인한 오차는 앞절에서 논술한 바와 같이 정확히 구할 수 없으나 방대한 양의 실험결과를 추적해 볼 때 약  $\pm 2\%$ 로 추정된다. 본 연구에서 사용한 전자저울과 X-Y 기록기의 교정오차는  $\pm 1\%$  이내로 주어진다.

## V. 결 론

본 논문에서는 초음파를 완전 반사시킬 수 있는 반사용 target과 완전 흡수시킬 수 있는 흡음용 target을 이용하여 초음파 음장하에서 이들 target에 가해진 방사음압을 전자저울로 측정하고, 이를 통하여 밀리와트 영역의 초음파 파워를 결정하는 방법에 대해 논술하였다. 또한 PZT 압전형 초음파 변환기를 이용하여 초음파 파워 측정장치의 성능을 분석하였다. 본 연구결과는 다음과 같이 요약 평가될 수 있다.

- 1) 본 연구에서 제작한 흡음용 target과 반사용

target을 사용하여 측정된 초음파 파워의 차이는 2%의 상대오차 이내에서 잘 일치 한다.

- 2) 저출력 측정결과로서, 약 0.6 mW 파워에 대해 13.4%의 상대오차를 유발시킨다. 따라서 1 mW 이하의 초음파 출력을 정밀하게 측정하기 위해서는 외부진동으로부터 측정시스템을 차폐시켜야 하며, 물 표면에서의 증발 및 온도변화에 기인한 잡음의 영향을 최소화 하기 위해 target의 부피를 가능한 한 줄여야 한다.
- 3) 재현성 실험결과 약 2%의 표준편차를 얻었다. 이와 같은 오차를 유발시키는 원인은 측정 환경이나 측정 조건의 변화에 따라 발생하는 target의 부력 변화, 전자저울을 비롯한 전자장비의 시스템 오차, 초음파 변환기에 인가되는 전압을 전 상태와 같은 전압으로 조정하는 문제 등으로 나눌 수 있다.

이제까지 논술한 측정장치내에서 유발할 수 있는 오차 이외에도 많은 오차 발생원이 있을 것으로 생각된다. 측정장치의 정밀도를 유지하고 정확한 오차 발생원에 대한 평가를 위해서는 다른 원리에 의한 측정방법과의 비교를 통해 모색하는 것이 바람직하다고 생각되며 앞으로 이에 대한 연구를 계속할 것이다.

## 참 고 문 헌

1. Herry, M. J., "Experimental studies on acoustic radiation pressure", J. Acoust. soc. Amer., 27, 891 (1955).
2. Herman, B. A., Harris, G. R., "Calibration of miniature ultrasonic receivers using a planar scanning technique", J. Acoust. soc. Amer., 57, 1436(1982).
3. Haran, M. E., Stewart, H. F., "Comparison of an acousto-optic and a radiation force method of measuring ultrasonic power", J. Acoust. soc. Amer., 57, 1436(1975).
4. Zieniuk, J., Chivers, R. C., "Measurement of ultrasonic exposure with a radiation force and thermal methods", Ultrasonic, 14,161(1976).
5. ISO Standards 3741-3746 (1977).
6. Gooberman, G. L., Ultrasonics, Hart Publishing com



pany, New York, 45~47 (1968).

- 7. Beissner, K., "The influence of membrane reflection on ultrasonic power measurements", *Acoustica*, Vol. 50, No. 3, 194-199(1982).
- 8. Kossoff, G., "Balance Technique for the measurement of very low ultrasonic power outputs", *J. Acoust. soc. Amer.*, 38, 880~881.

▲ 조문재



1957년 1월 1일생  
 1979년 2월 : 아주공과대학 전자공학과 졸업  
 1981년 2월 : 연세대학교 전자공학과 졸업  
 현재 : 한국표준연구소 음향진동연구실 선임연구원

▲ 황철호



1960년 10월 20일생  
 1983년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 졸업  
 1985년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 대학원 졸업  
 현재 : 한국표준연구소 음향진동연구실 연구원

▲ 서상준



1952년 5월 8일생  
 1975년 2월 : 서강대학교 물리학과 졸업  
 1977년 2월 : 한국과학기술원 물리학과 졸업  
 현재 : 한국표준연구소 음향진동연구실 실장

▲ 차 일 환 : 9 권 1 호 참조