

비선형 매질로서 기포막과 두 음파의 상호작용

김 병남*, 윤 석왕*, 최 복경**

* 성균관대학교 물리학과 음향학연구실

** 한국해양연구소 해양물리연구단

Interaction of two sound waves with bubble screen as a nonlinear medium

B. N. Kim*, S. W. Yoon*, and B. K. Choi**

* Acoustics Research Laboratory, Department of Physics,
Sung Kyun Kwan University

** Physical Oceanography Division,
Korea Ocean Research and Development Institute

요약

수중에서 기포의 강한 비선형성을 이용하여 기포막 상의 두 입사 음파의 상호작용 영역으로부터 산란된 차주파수 성분 음파의 확인과 두 입사 음파의 전파방향으로 차주파수 음파가 분포하고 있음을 관측하였다. 본 논문에서는 기포막을 이용하여 두 입사 음파의 상호작용 영역으로부터 산란된 차주파수 성분 음파의 지향특성을 예측할 수 있음을 제시하였다.

1. 서론

기포는 비선형성이 강한 산란체이므로 기포로부터 산란된 음파들도 강한 비선형적 성질을 나타낼 수 있다. 산란된 음파들은 입사 음파의 기본 주파수에서 뿐만 아니라, 배 진동 주파수에서도 관측될 수 있으며, 기포에 두 음파가 입사하는 경우에는 기본 주파수의 합 및 차주파수에서도 관측될 수 있다[1]. 이러한 산란된 음파들은 기포의 공진 주파수와 관련하여 더욱 강하게 나타날 수 있다. 기포의 공진 주파수와 기포에 입사되는 두 음파의 배 진동수나 합 및 차주파수가 일치하면, 기포는 자신의 공진 주파수에 해당하는 음파를 강하게 산란시킬 수 있다. 기포의 이러한 공진 주파수와 관련된 비선형 현상을 이용하여 수중에 존재하는 기포의 크기와 기포 집단의 밀도 분포를 예측할 수 있으며[2], 의학적으로 인체의 혈관내에 형성된 기포의 흐름 속도를 측정할 수도 있다[3].

수중에서 두 음파의 상호작용에 의해 발생된 비선형 음파 가운데 차주파수 성분의 음파는 작은 크기의 음파 변환기를 이용하여 매우 지향성이 좋으며, 입사 음파에 비해 상대적으로 낮은 저주파수의 음파를 발생시키는 파라메트릭 어레이를 만드는데 자주 사용된다. 이 파라메트릭 어레이는 저주파수의 음파를 발생 시키기 위해 큰 음파 변환기를 만들 필요가 없다는 장점이 있지만, 효율이 매우 낮은 단점이 있다. 이를 해결하기 위해, 1980년대부터 비선형성이 강한 기포들을 이용하여 파라

메트릭 어레이 효과를 향상시킬 수 있는 실험과 이론이 이루어졌지만, 기포는 강한 비선형성과 함께 자신의 공진 주파수에서 음파를 강하게 흡수하는 성질 때문에 효율면에서는 여전히 문제가 남아있다. 최근에는 이러한 문제를 해결하기 위해 기포층의 두께 모드를 이용하여, 이 효과를 더욱 증진시키려는 이론과 실험이 이루어졌다[4][5].

해양에서 음파들이 전파할 때, 많은 기포들로부터 음파 산란이 일어나며, 이러한 산란은 결맞음 산란(coherent scattering)과 비결맞음 산란(incoherent scattering)으로 구분하여 설명할 수 있다. 결맞음 산란은 산란된 음파들과 입사된 음파들이 서로 공간적으로 상관성을 가지며, 물과 기포층을 하나의 연속된 매질로 고려함으로써 입사 음파들의 전파 방향으로 전방산란이 우세하게 일어나는 특징이 있다. 이러한 결맞음 산란은 비선형적으로 기포를 이용하여 파라메트릭 어레이 효과를 만드는데 적용되었다. 비결맞음 산란은 산란된 음파들의 위상이 서로 복잡하게 분포하여 관측지점에서의 음압이 0이 되므로 음의 세기를 이용하여 관측이 이루어지며, 후방산란이 우세하게 일어나는 특징이 있다. 이러한 후방산란은 기포의 공진이 입사 음파들의 주파수에서 일어날 때 쉽게 관측될 수 있다[6].

본 논문에서는 두 음파가 일정한 각으로 교차하는 상호작용 영역에 기포막을 형성시킴으로써 기포막으로부터 차주파수 성분의 결맞음 비선형 음파 산란이 우세하게 일어날 수 있음을 관측하고, 기포막을 이용하여 상호작용 영역으로부터 산란된 차주파수 음파의 지향특성을 예측할 수 있음을 제시하였다.

II. 실험 방법

A. 실험 장치

실험에 사용된 수조는 크기가 $900 \times 600 \times 600 \text{ mm}^3$ 이며, 수조 벽면으로부터의 산란된 음파의 수신을 최소화하기 위해 벽면에 무반향 흡음 물질을 부착하였다.

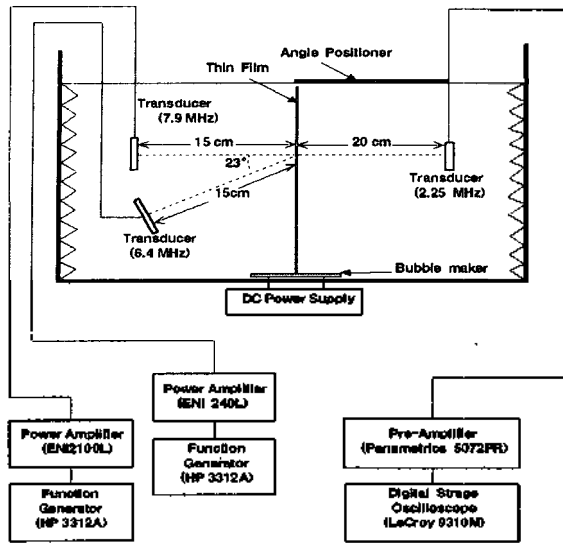


그림 1. 실험 장치도

수중에서 기포를 발생시키기 위해 전기 분해법을 이용한 기포 발생 장치를 수조의 가운데 위치에 설치하였으며, 20 V의 전압과 2 A의 전류를 입력하였다. 이때, 주로 발생된 기포는 수소 기체의 기포이다. 기포 발생 장치 위에 크기가 $185 \times 220 \text{ mm}^2$ 이고, 사면이 평평하게 고정된 얇은 막(thin film)을 설치하였으며, 이 막에 두 음파가 23° 의 각으로 교차하도록 150 mm의 거리에 두 개의 음파 변환기를 설치하였다. 두 음파 변환기 가운데 하나는 직경이 22.6 mm이고, 구동 공진 주파수가 7.5 MHz인 음파 변환기로 본 실험에서는 7.9 MHz로 구동하였다. 다른 하나는 직경이 50 mm이고, 구동 공진 주파수가 2.1 MHz인 음파 변환기로 두 음파의 상호작용 영역으로부터 1.5 MHz의 차주파수 성분의 음파를 발생시키기 위해 약 3배 진동에 해당되는 6.4 MHz의 주파수로 구동하였다.

이때, 각 음파 변환기는 두 개의 함수 발생기(HP3314A)가 각각 연결되어 있는 출력 증폭기(ENI 240L, ENI 2100L)에 연결되어 있다. 함수 발생기로부터 공급된 파형은 연속파 형태의 정현파이며, 수중에서 두 음파 변환기로부터 입사된 음압은 6.4 MHz와 7.9 MHz 대해서 각각 $2.58 \times 10^4 \text{ Pa}$ 와 $1.25 \times 10^4 \text{ Pa}$ 로 측정되었다. 상호작용 영역으로부터 산란된 음파들을 수신하기 위해 얇은 막으로부터 200 mm 떨어진 거리에 공진 주파수가 2.25 MHz인 음파 변환기를 설치하였다. 이 변환기는 수조 윗 부분에 고정된 각도기와 연결되어 1° 의 간격으로 회전이 가능하며, 수신된 신호는 전치 증폭기(Panametrics Pulser/Receiver Model 5072PR)를 이용하여 30 dB 증폭한 후 디지털 오실로스코프(LeCroy 9310M)를 통해 분석하였다.

B. 기포막을 이용한 비선형 산란 음파의 측정과 상호작용 영역의 결정

기포들에 의해 산란된 비선형 음파들 가운데 두 입사 음파의 차주파수 성분의 측정을 위해 두 음파 변환기를 구동시킨 상태에서 기포 발생장치로부터 기포를 60초 동안 발생시켰다. 이때, 수표면을 향해 올라가는 기포들

가운데 일부 기포들은 두 음파가 23° 의 각으로 교차하는 얇은 막 상의 상호작용 영역에 달라붙게 된다. 60초의 시간이 지나면 기포 발생장치를 끄고, 모든 기포들이 수표면과 얇은 막으로 이동할 때까지 기다린 후 막에 형성된 기포막으로부터 산란된 차주파수 성분의 음파들을 측정하였다. 얇은 막을 사용하지 않거나, 그 막이 존재하는 상태에서 기포를 연속적으로 발생시키는 경우는 두 입사 음파에 의해 기포의 밀립 현상이 두드러지게 발생하게 된다. 이러한 경우는 기포집단을 기포막(bubble screen) 또는 기포층(bubble layer)으로 고려하기가 불가능하므로, 기포 발생장치의 가운데에 얇은 막을 놓고 60초 동안 기포를 발생시켜 그 막에 기포를 붙임으로써 기포막의 효과를 얻었다.

두 입사 음파의 상호작용 영역의 기하학적인 모양은 입체적으로 나타나지만, 기포는 물에 비해 비선형성이 매우 강하므로 상호작용 영역을 기포막 상의 영역으로 한정시킬 수 있다. 두 음파 변환기의 단면이 원의 모양을 하고 있으므로 상호작용 영역을 2차원의 원환형 모양으로 가정 할 수 있으며, 영역의 직경은 입사 음파의 빔폭과 음파 변환기로부터 기포막까지의 거리를 이용하여 삼각법으로 결정하였다. 6.4 MHz와 7.9 MHz의 입사 음파에 대해 빔폭은 각각 3.9° 와 5.3° 로 측정되었으며, 삼각법을 이용한 두 입사 음파의 빔폭 길이는 음파 변환기로부터 150 mm의 거리에서 각각 10 mm와 14 mm로 계산되었다. 따라서, 기포막은 6.4 MHz의 음파에 대해서 23° 의 각으로, 7.9 MHz의 음파에 대해서 수직으로 음파를 받고 있으므로, 기포막 상에서 두 음파의 상호작용 영역의 직경은 10 mm를 $\cos 23^\circ$ 로 나눈 값인 10.9 mm로 결정하였다. 그림 3은 이러한 설명을 쉽게 이해하기 위해 나타낸 그림이다.

시간이 지남에 따라 얇은 막에 달라붙은 기포가 물에 녹아 버리는 이유 때문에 수신용 음파 변환기의 이동시 얇은 막에 붙어있는 기포를 제거하고, 다시 60초 동안만 기포를 발생시킨 후 산란음파의 측정을 반복하였다.

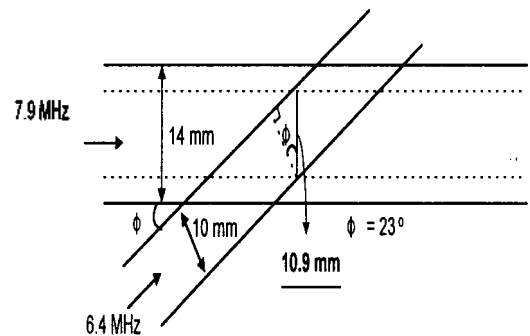


그림 3. 두 음파의 상호작용 영역의 직경

C. 얇은 막에 붙은 기포의 크기 분포 측정

수중에서 기포의 크기 분포를 측정하는 방법은 크게 선형적인 방법과 비선형적인 방법으로 나눌 수 있다. 선형적인 경우는 수중에서 기포가 자신의 공진 주파수에 해당하는 음파가 입사되었을 때, 그 음파를 강하게 흡수하는 성질을 이용한 것이다. 어와는 반대로 비선형적인 방법은 충분히 큰 진폭을 가지는 두 음파가 기포에 입사될 때, 두 음파의 배 진동과 합 및 차주파수 성분의 비선형 음파들 가운데 한 성분이 기포의 공진 주파수와 일치하는 경우 기포로부터 강하게 방출 또는 증

폭될 수 있다는 성질을 이용한 것이다.

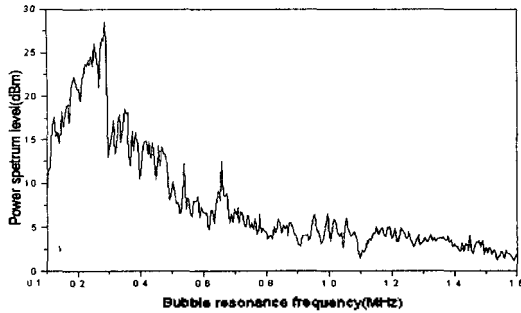


그림 4. 기포의 공진 주파수에 따른 음파 흡수 스펙트럼

본 실험에서는 기포의 크기를 측정하기 위해 기포 발생장치에 20 V의 전압과 2 A의 전류를 공급하여 기포들이 연속적으로 발생된 상황에서 선형적인 방법을 이용하여 수중에서 기포들의 크기 분포를 측정하였다. 이렇게 측정하여 얻어진 주요 크기 분포의 기포들이 바로 얇은 막에 붙어 기포막을 형성하므로, 기포의 크기 분포를 간접적으로 쉽게 구할 수 있다. 그림 4는 기포들의 공진 주파수에 따른 음파의 흡수 정도를 나타낸 것으로 공진 주파수 285 kHz 부근에서 반경이 12 μm 주변인 기포들이 기포막을 형성시킨다는 것을 알 수 있다.

III. 결과 및 분석

A. 측정 결과 및 분석

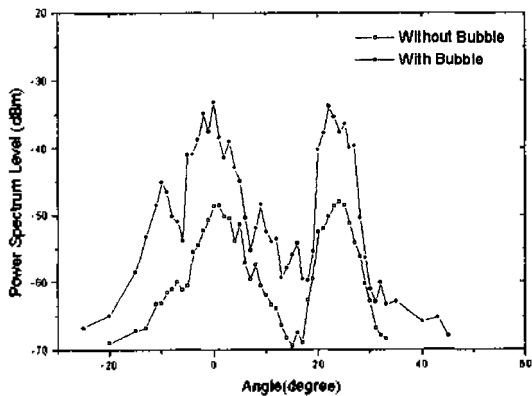


그림 5. 차주파수 성분의 비선형 음파

그림 5는 두 음파의 상호작용 영역에 기포의 존재 유무에 따라 그 영역으로부터 발생된 차주파수 성분 음파의 공간 분포를 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 수중에서 입사된 두 음파의 상호작용 영역에 기포가 존재하지 않는 경우에도 차주파수 성분의 음파가 관측되고 있음을 알 수 있다. 이것은 수중에서 두 입사 음파의 진폭이 충분히 큰 경우에 대해서 상호작용 영역에 존재하는 물 자체가 비선형 매질로 작용하여 두 입사 음파의 비선형적 상호 작용을 촉진시킨 결과로 해석할 수 있다. 또한, 상호작용 영역에 기포가 존재하는 경우 그 영역으로부터 발생된 차주파수 성분의 음파가 물의 경우와 비교해 최대 17 dB 더 증가한 것을 볼 수 있다. 이

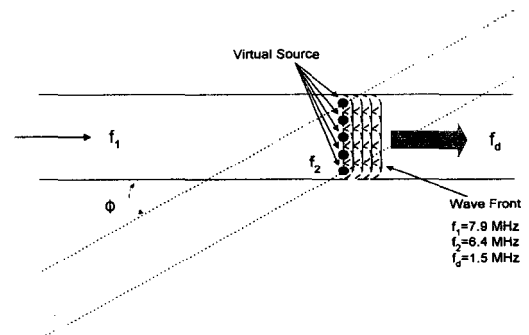
것은 물 자체의 비선형 변수(nonlinear parameter)가 3.5인데 비해 기포는 1000이상을 가지기 때문에, 볼보다 기포가 두 음파의 상호작용을 더욱 강하게 촉진시킨 결과로 해석할 수 있다.

실험에서 측정된 기포들의 반경은 12 μm 주변에서 분포하고 있으며, 이 경우 기포들의 공진 주파수는 285 kHz 주변이므로, 우리는 실험에서 측정된 차주파수 성분의 음파가 기포의 공진과는 관계없이 나타난 비선형 효과임을 쉽게 알 수 있다.

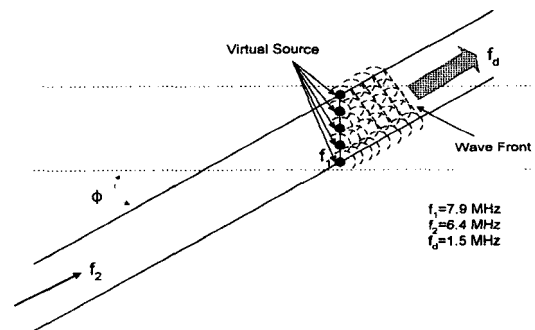
그림 5에서 우리는 두 음파의 상호작용 영역으로부터 산란된 차주파수 성분의 음파가 기포의 존재 유무와 관계없이 항상 두 입사 음파의 축을 중심으로 분포하고 있음을 알 수 있으며, 다음과 같이 해석할 수 있다.

기포막이 존재하지 않는 경우, 상호작용 영역은 차주파수 성분의 음파를 발생시키는 일종의 가상 음원(virtual source)들이 배열되어 있는 것으로 고려할 수 있으며, 이 음원들이 두 입사 음파들 가운데 한 성분의 음파로 여기된(excited) 상태에서 다른 한 성분의 음파를 받아들임으로써 차주파수 성분의 음파가 입사 음파의 전파 방향으로 산란된 것으로 해석할 수 있다. 이 경우 가상 음원들은 일종의 비선형 음파를 발생시키는 방사기로 볼 수 있으며, 그림 6은 이러한 설명을 위해 나타난 그림이다.

상호작용 영역에 기포막이 존재하는 경우도 기포를 차주파수의 음파를 발생시키는 음원으로 고려함으로써, 기포막을 하나의 음파 방사기로 생각할 수 있다.



(a) 가상 음원이 6.4 MHz의 음파에 의해 여기된 상태에서 7.9 MHz의 음파에 의해 산란된 차주파수 성분의 비선형 음파.



(b) 가상 음원이 7.9 MHz의 음파에 의해 여기된 상태에서 6.4 MHz의 음파에 의해 산란된 차주파수 성분의 비선형 음파.

그림. 6. 가상 음원들로부터 차주파수 성분의 비선형 음파방출.

그러나, 이러한 고려를 위해서는 산란체로서 기포의 특

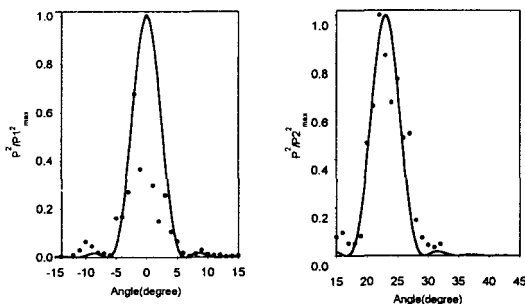
성을 다음과 같이 규명할 필요가 있다.

기포의 반경이 입사 음파의 파장보다 매우 작다면, 즉, $ka_B \ll 1$ 이면, 단일 기포의 표면상의 모든 위치에서 입사 음파는 균일하게 분포할 수 있으며, 입사 음파의 산란된 부분은 기포의 전 방향으로 진행하게 된다. 여기서, k 는 입사 음파의 파수, λ 는 입사 음파의 파장, a_B 는 기포의 반경이다. 수중에서의 음속 1481 m/s 를 기준으로 본 실험에서 사용한 입사 음파의 파장은 7.9 MHz 와 6.4 MHz 의 주파수에 대해서 각각 $187 \mu\text{m}$ 와 $231 \mu\text{m}$ 이므로 기포의 반경이 $a_B \ll 30 \mu\text{m}$ 이면, 단일 기포로부터 산란된 입사 음파는 전 방향으로 진행하게 된다. 따라서, 상호작용 영역에 반경 $30 \mu\text{m}$ 보다 작은 단일 기포가 존재하면, 입사 음파들은 기포 표면상의 모든 위치에 균일하게 분포하게 되며, 기포는 음파들의 비선형적 상호작용으로 발생한 차주파수 성분의 음파를 전 방향으로 방출시킬 수 있다. 그러므로 우리는 두 입사 음파의 상호작용 영역에 위치한 기포막을 차주파수 성분의 음파를 전 방향으로 방출시키는 비선형 음원들의 집합으로 고려할 수 있다. 본 실험에서 기포막 상의 상호작용 영역의 직경은 이미 II-B절에서 언급했듯이 10.9 mm 로 결정하였으며, 기포들의 반경 분포는 $12 \mu\text{m}$ 주변이므로 비선형 효과를 증가시키는 상호작용 영역의 주요 기포들을 $12 \mu\text{m}$ 의 동일한 반경을 갖는 기포들로 간주하여 기포막 상의 상호작용 영역을 N 개의 동일한 음원들이 원판형으로 배열된 파라메트릭 방사기로 고려하였다. 이러한 방사기는 일종의 평면 원형 피스톤(plane circular piston)[7]의 형태로 생각될 수 있으므로, 각 차주파수 성분 음파의 지향특성은 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$H_1(\theta) = \left[\frac{2J_1\left(\frac{\pi D}{\lambda_s} \sin \theta\right)}{\left(\frac{\pi D}{\lambda_s}\right) \sin \theta} \right]^2 \quad (1)$$

$$H_2(\theta) = \left[\frac{2J_1\left(\frac{\pi D}{\lambda_s} \sin(\theta - \varphi)\right)}{\left(\frac{\pi D}{\lambda_s}\right) \sin(\theta - \varphi)} \right]^2 \quad (2)$$

D 는 기포막 상의 상호작용 영역의 직경이고, λ_s 는 차주파수 성분 음파의 파장이다. 그림 7은 위 식으로부터 계산된 결과와 실험 결과와의 비교를 나타낸 것이다.

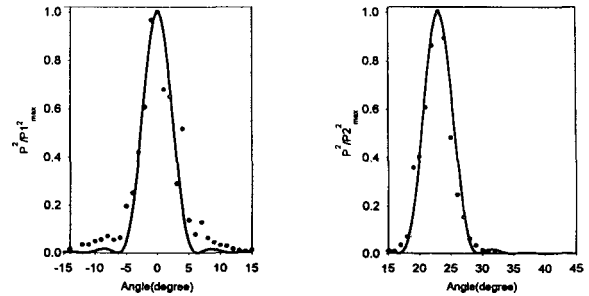


$P1_{\max}$: 0° 의 각도에서 차주파수 성분의 음압
 $P2_{\max}$: 23° 의 각도에서 차주파수 성분의 음압

그림 7. 기포막이 존재하는 경우에 대한 차주파수 지향 특성

상호작용 영역에 기포막이 존재하지 않는 경우, 상호작용 영역에 배열된 가상 음원들의 위치를 얇은 막상의

위치로 한정한다면, 차주파수 음파의 지향특성 또한 위 식들로부터 구할 수 있으며, 그림 8은 그 결과이다.



$P1_{\max}$: 0° 의 각도에서 차주파수 성분의 음압
 $P2_{\max}$: 0° 의 각도에서 차주파수 성분의 음압

그림 8. 기포막이 존재하지 않는 경우에 대한 차주파수 지향특성

IV. 결론

수중에서 두 음파의 상호작용으로 인해 차주파수 성분의 새로운 비선형 음파가 상호작용 영역에서 발생할 수 있다는 사실과, 그 영역에 기포가 존재하는 경우 더욱 강하게 발생할 수 있다는 사실을 확인하였으며, 얇은 기포막 상의 상호작용 영역으로부터 산란된 차주파수 성분 음파가 두 입사 음파의 전파 방향으로 분포하는 것을 확인함으로써, 비결맞은 산란 보다 결맞은 산란이 우세하게 일어날 수 있다는 사실을 알 수 있었다. 본 논문에서는 기포막과 두 입사 음파의 빔폭을 이용하여 상호작용 영역의 가하화적인 모양을 결정할 수 있었으며, 이 영역으로부터 산란된 차주파수 성분 음파의 지향특성을 원형 피스톤 형태의 음파 발생기에 대한 지향특성 관계식을 적용함으로써 잘 예측할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] E. A. Zaboloskaya and S. I. Soluyan, "Emission of harmonic and combination frequency waves by air bubbles," *Sov. Phys. Acoust.* **18**, 396-398 (1972).
- [2] V. L. Newhouse and P. Mohana Shankar, "Bubble size measurements using the nonlinear mixing of two frequencies," *J. Acoust. Soc. Am.* **75**(5), 1473-1477 (1984).
- [3] I. N. Didenkulov, E. J. Kim, S. W. Yoon, and A. M. Sutin, "Nonlinear Doppler effect and its use for bubble flow velocity measurement," *J. Acoust. Soc. Am.* (1999, submitted).
- [4] O. A. Druzhinin, L. A. Ostrovsky, and A. Prosperetti, "Low frequency acoustic wave generation in a resonant bubble layer," *J. Acoust. Soc. Am.* **100**(6), 3570-3580.
- [5] A. Ostrovsky, A. M. Sutin, I. A. Soustova, A. I. Matveyev, and A. I. Potapov, "Nonlinear low-frequency sound generation in a bubble layer: Theory and laboratory experiment," *J. Acoust. Soc. Am.* **104**(2), 722-726 (1998).
- [6] M. Gensane, "Bubble population measurements with a parametric array," *J. Acoust. Soc. Am.* **95**, 3183-3190 (1994).
- [7] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics* (Wiley, New York, 1982) 3rd ed., 176-182.