

수중 기포층의 비선형 음향 효과에 대한 연구

이 영호, 윤 석왕

성균관대학교 물리학과 음향학연구실

A Study on Nonlinear Acoustic Effect of Bubble Layer in Water

Young Ho Yie, Suk Wang Yoon

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

요약

수중에서 발생한 기포에 음파가 입사되었을 때, 입사된 음파는 물 속의 기포들에 강제적인 진동을 주어 새로운 음원으로 작용하게 한다. 이런 경우에 기포의 진동은 비선형적인 진동 특성이 강하게 나타나게 되어, 기포는 입사된 음파에 의존하는 비선형 인자로서 작용하게 된다. 본 논문에서는 수중에 발생하는 기포층의 비선형응답 및 다른 형태의 응답을 실험적으로 관찰하기 위하여, 인위적으로 제작된 기포 발생장치를 이용하여 발생한 기포층에 음파를 입사하였다. 이때 입사된 음파는 기포들과의 상호작용으로 인하여 여러 가지 응답을 나타내었으며, 비선형 응답으로써 배진동 세기의 현저한 증가와 합주파수 음파 발생 등이 두드러지게 나타났다. 또한 개개 기포의 공진 주파수 근처에서는 물론, 그보다 높은 고주파수에서도 합주파수 형태의 비선형응답이 매우 특징적으로 관찰되었다.

1. 서론

수중에서의 기포는 수중 음향학적으로 매우 흥미로운 대상으로 인식되어 왔다. 수중 기포는 고체구와는 달리 표면이 자유롭게 움직일 수 있고, 팽창과 수축을 쉽게 할 수 있으며, 팽창과 수축 현상으로 기포는 매우 강한 음향 공진 현상을 나타내게 된다.

수중 기포는 반경에 반비례하는 공진 주파수를 가지며, 자신이 가진 공진 주파수의 음파를 흡수 또는 방출하게 된다. 기포가 집단을 형성하고 있는 경우에 기포 집단에 의한 방출음파는 개개 기포의 공진 주파수보다 낮은 주파수를 가진다는 사실은 이미 이론 및 실험적으로 연구되었으며^{1,2}, 이에 따른 방출주파수는 근

사적으로 기포 집단의 전체 크기에 반비례하고, 기포 집단의 기체 함유비에 의존한다는 결과가 도출되었다. 이때 기포들은 서로가 서로에게 영향을 미치는, 상호작용으로 인해 기포들이 방출하는 음파의 주파수가 변화한다. 즉 기포가 집단으로 포함된 물에서는 기포들의 상호작용으로 인해 변화된 음파들이 존재하게 된다. 그러므로 기포들이 포함된 물에 양의 음파를 입사시켰을 때, 입사된 음파는 기포들에 새로운 진동을 주게 되고, 이 기포들의 진동으로 인해 새로운 음파가 발생하게 된다. 이런 경우에 기포들의 진동은 음속, 분산 및 흡수 등에 변화를 일으키고, 기포들은 입사된 음파와의 상호작용으로 인한 비선형 효과를 야기시키므로 매우 커다란 비선형 인자로서 작용을 하게 된다.

여러한 비선형 현상으로서 잘 알려져 있는 것 중 하나는, 서로 다른 두 개의 근접한 주파수의 음파를 기포층에 입사시킨 경우 입사된 두 개의 주파수 차에 해당하는 차주파수가 발생하는 것이 대표적이라 하겠다. 많은 사람들에 의해 parametric radiation에 기포를 이용, 이론 및 실험적으로 연구되었으며^{3,4}, 최근에는 기포층을 이용하여 차주파수의 발생을 꾀하기도 하였다. 이는 기포층의 경계면에서 음속의 강쇠를 유발하는 음향 임피던스의 급격한 차이로 인해 경계면이 평면 공진기로 작용되는 현상을 이용한 것이다^{5,6}. 이외에도 많은 다른 비선형 현상들에 대해 여러모로 분석, 계산, 확인되어 왔다. 특히 차주파수의 발생을 위하여, 현재까지는 반드시 서로 다른 두 개의 음원을 이용하여, 수중 기포층을 매개체로 2개의 음원의 차를 만들어 냈다. 그리고, 근접한 서로 다른 두 개의 주파수를 이용하였기 때문에, 차주파수는 상대적으로 저주파수가 되는 것은 당연히 유추되는 내용이다.

위와 같은 연구들에서는 낮은 저주파수를 만들어 낼 수 없고 2개의 별도 음원을 사용해야 한다는 특징을 갖고 있다. 본 논문에서는 위의 연구들과는 대조적으로 하나의 별도 음원을 이용하여 수중 기포층을 강제로 진동시키고, 그에 따른 입사 음파와 수중 기포층과의 상호작용을 통해 다른 형태의 비선형 현상을 발생시킨다. 이런 방법을 통해 일반적인 비선형 현상은 물론, 차주파수의 낮은 저주파수가 아니라 고주파수를 갖는 항주파수의 발생을 실험적으로 고찰하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험장치

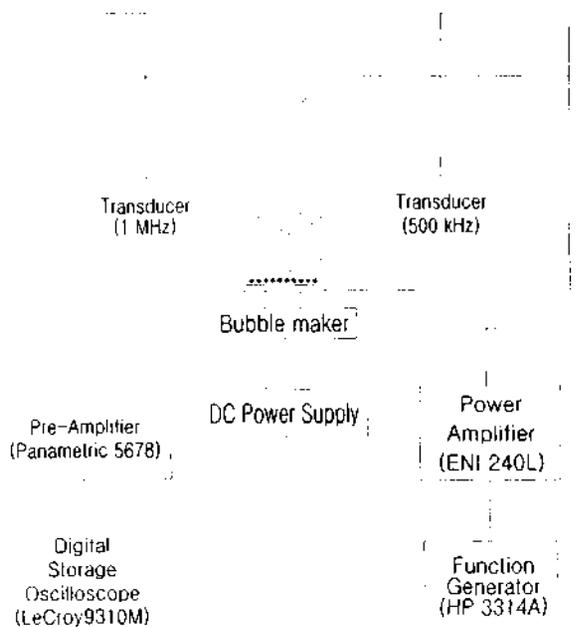


그림 1. 실험 장치

실험에 사용된 수조의 크기는 90x60x60 cm 이고, 수조내부의 벽면은 우반향 물질을 부착하였다. 물의 깊이는 47 cm, 2개의 음파 변환기(Transducer) 사이의 거리는 46 cm이고, 수신되는 음파 변환기와 기포층과의 거리는 25 cm이다. 함수발생기(function generator)에서 150 mV의 크기를 가진 정현파를 연속파 형태로 입력하였다. 이렇게 발생된 음파는 출력 증폭기(power amplifier)를 통해서 공진 구동주파수가 450 kHz인 비초점 음파 변환기에서 구동되었다. 이렇게 발생된 음파는 46 cm 떨어진 1MHz의 공진 구동주파수를 갖는 비초점 음파 변환기에 수신 된다. 이렇게 받은 신호를 전치 증폭기(Pre-amplifier)를 통해서 증폭한 다음, 오실로스코프로 파형을 확인·분석하였다.

인위적인 기포 발생장치는 전기분해 방법을 이용하였고, 이때 기포 발생장치에는 전압은 6 V, 전류는 1.2

A가 입력되었다. 발생하는 기포의 크기는 대략 10 ~ 20 μm 정도의 크기를 가지고 있는 것으로 측정되었으며, 기체 함유비는 대략 5×10^{-6} 정도로서 측정되었다. 형성된 기포층의 두께는 약 5-10 cm이고, 기포층의 높이는 45 cm이다.

2-2. 실험방법

두 개의 음파 변환기를 시간적으로 동기화 시킨 후 하나에서 파열음을 발생시키고, 다른 하나에서 수신하는 방법으로 음속을 측정하였으며, 측정된 음속은 1491 m/s이다. 또한 100 kHz부터 2 MHz까지 함수발생기의 진동수 쓸기(frequency sweep)기능을 이용해 최적 구동 영역으로 400-600 kHz를 얻었다. 구동하는 음파 변환기와와의 조합으로 얻어진 최적 구동 주파수영역인 430, 450, 500 kHz등을 차례로 구동시키면서, 기본 진동수어외에 배진동을 관찰하였다. 이때 연속파를 사용하였으며, 물에 입사된 음파는 먼저 기포층을 통과하지 않았을 때와 기포층을 통과하였을 때를 구별해서 오실로스코프를 통하여 관찰한 후 주파수 분석을 통하여 비선형 효과를 측정하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 기포의 공진 주파수

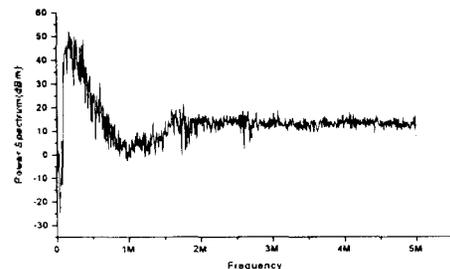


그림 2. 수중 기포층을 통과하므로 인한 음파의 투과 손실

그림 2는 수중 기포층을 통과한 음파의 투과 손실을 나타내는 그림이다. 이 그림을 통해서 우리는 기포층을 이루고 있는 기포들에 대한 크기분포와 기체 함유비를 구할 수 있다¹⁾. 이렇게 구한 기포들의 크기는 대략 10 ~ 20 μm의 분포를 이루었고, 이때 기체 함유비(Void Fraction)는 대략 5×10^{-6} 정도이다. 이와 같은 결론을 토대로 보면, 기포의 공진 주파수는 대략 250 kHz를 중심으로 165~330 kHz의 영역으로 가우시안 분포를 가진다. 본 실험에서는 기포를 강제 진동시키기 위해서 기포의 공진 주파수의 2배에 해당하는 주파수를 가진 음파를 입사시켰다.

3.2 주파수 분석과 해석.

그림 3과 그림 4에서는 입사된 음파가 기포층을 통과한 후의 경우와 통과 하지 않은 경우 따른 수신 음파의 FFT결과이다. 그림 3에서는 기포층이 없을 때를 나타낸 것으로서, 입사된 음파의 기본 주파수에 해당하는 430 kHz와 그것의 배진동이 나타났다. 배진동은 음파 변환기의 비선형적 구동으로서 나타난 것이다. 그림 4에서는 그림 3에서의 음파가 기포층을 통과한 후에 수신된 음파를 나타낸 것으로서, 기본 주파수에서 4.4 dB의 강소가 있었고, 배진동은 각각 12.4, 12.7 dB가 증가하였다. 이는 기포층이 비선형적인 매질로서 작용함을 보여주고 있다. 또한 여기서 특이할 사항은, 기본 진동수와 배진동 사이에 나타나고 있는 중간주파수 진동을 볼 수 있다.

그림 5,6,7,8들은 입사되는 음파의 기본 주파수를 변화시켜 가면서 측정한 실험 결과로서 그림 3,4와 마찬가지로 기본 주파수의 배진동의 세기가 증가하였고 중간주파수 진동이 발생하였다.

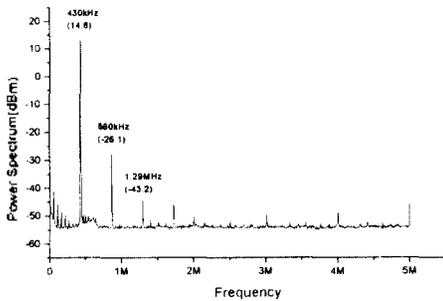


그림 3. 기포층이 없을 때 수신 음파의 Power Spectrum(430 kHz)

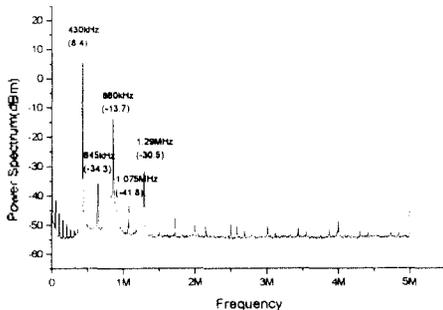


그림 4. 기포층을 통과한 후 수신 음파의 Power Spectrum(430 kHz)

이 실험에서 나타난 결론은 2가지로 설명될 수 있다. 첫째, 수중 기포층은 비선형 매질로서 배진동의 세기를 증가 시켰다. 그림에서 보면, 기본 진동수는 기포가 존재함으로 인해 에너지가 감소하여 나타났지만, 그의 배진동의 세기는 오히려 증가하는 결과를 낳았다. 이는 기포층의 표면음 음파가 때림으로 인한 경계 조건의 변화로서 나타나는 결과이다.

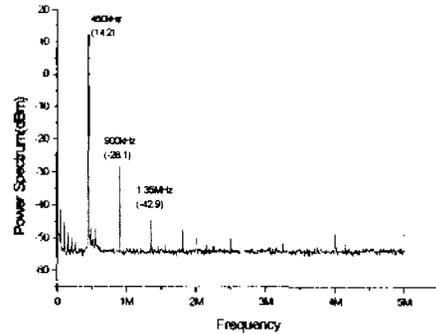


그림 5. 기포층이 없을 때 수신 음파의 Power Spectrum(450 kHz)

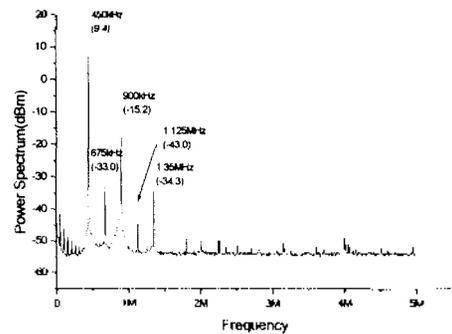


그림 6. 기포층의 통과한 후 수신 음파의 Power Spectrum(450 kHz)

둘째로 중간주파수 진동의 발생이다. 입사 음파가 기포층을 강제 진동 시키고, 강제 진동된 기포들은 자신의 공진 주파수에 해당하는 음파를 방출한다. 이때 방출된 음파는 계속해서 입사되고 있는 음파와의 기포층에서의 상호작용을 한다. 이렇게 상호작용을 통해 생성된 진동은 수중 기포의 공진 주파수와 입사 음파와의 합주파수로 해석할 수 있다. 이 생성된 음파가 바로 중간 주파수의 진동이다. 결국 수중 기포층은 새로운 음원 및 합주파수를 만들어 주는 매개체로서 모두 사용된다. 다시 말해, 먼저 입사하는 입사 음파가 기포들을 들뜨게 하고, 들뜬 기포들은 음파를 방출하며, 계속해서

서 입사하는 음파와 주파수 상호작용을 통해 합주파수를 나타내었다.

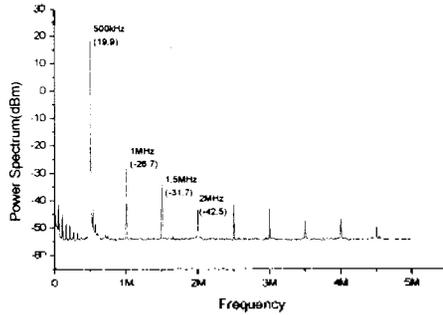


그림 7. 기포층이 없을 때 수신 음파의 Power Spectrum(500 kHz)

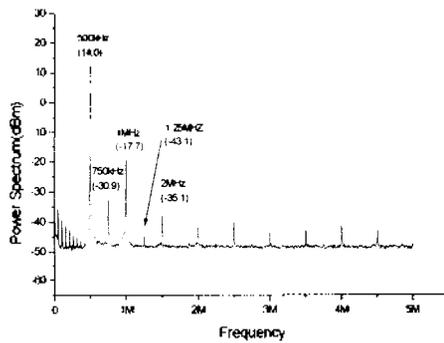


그림 8. 기포층을 통과한 후 수신 음파의 Power Spectrum(500 kHz)

4. 결론

수중에서 존재하는 기포층의 비선형 현상을 실험적으로 관찰하기 위하여, 인위적으로 제작된 기포 발생장치를 통해 발생한 기포층에 음파를 입사시켜 관찰한 결과, 입사된 음파는 기포층과, 기포층의 기포들과의 상호작용으로 인한 비선형 응답인 배진동 세기의 현저한 증가와 합주파수 진동 발생을 초래했다. 또한 기포 각각의 공진 주파수 근처에서는 물론, 그보다 높은 2배 이상의 고주파수에서도 기포의 공진을 일으킬 수 있음이 나타났다. 여기서 수중 기포층은 두 가지 역할을 하게 되는데, 하나는 경계면의 조건 변화를 일으켜 배진동 세기를 증가시키는 매질로서의 역할이고, 다른 하나는 입사된 음파로 인한 강제 진동을 통해 발생한 음원으로의 역할이다. 비록 입사 음파에 의존하는 음원이지만 음원으로서는 훌륭히 역할을 수행한다.

어는 별도의 2개의 음원을 이용한 차주파수 실험과 비교되는 것으로서, 하나의 별도 음원만을 사용하여 수중 기포층과의 상호작용을 통해 차주파수 진동을 발생시키는 것은 물론, 합주파수를 이용해 고주파수 영역의 음파를 발생 시키고자 할 때 사용하면 효과적일 것이다.

감사의 글

본 논문은 '63 학술진흥재단의 지원한 연구과제로 이루어진 연구 결과중 하나이다. 이에 연구에 지원해 주신 재단측에 많은 감사 드립니다.

5. 참고문헌

- [1] Kerry W. Commander, and Andrea Prosperetti, "Linear pressure waves in bubbly liquids: Comparison between theory and experiments," *J. Acoust. Soc. Am.* **85**(2), 732-746 (1989).
- [2] S. W. Yoon, L. A. Crum and A. Prosperetti, "An Experimental investigation of bubble clouds as source of ambient noise," *J. Acoust. Soc. Am.* **86**, S88 (1989).
- [3] S. W. Yoon, L. A. Crum, A. Prosperetti and N. Q. Lu, "An investigation of the collective oscillations of a bubble cloud," *J. Acoust. Soc. Am.* **89**, 700-706 (1991).
- [4] L. Kustov, V. Nazarov, L. Ostrovsky, A. Sutin, and S. Zamolin, "Parametric acoustic radiator with a bubble layer," *Acoust. Lett.* **6**, 15-17 (1982).
- [5] V. E. Nazarov and A. M. Sutin, "Far-field characteristics of a parametric sound radiator with a bubble layer," *Sov. Phys. Acoust.* **30**, 477-479 (1984).
- [6] Oleg A. Druzhinin, Lev A. Ostrovsky, and Andrea Prosperetti, "Low-frequency acoustic wave generation in a resonant bubble layer," *J. Acoust. Soc. Am.* **100**(6), 3570-3580 (1996).
- [7] Lev A. Ostrovsky, Alexander M. Sutin, Irina A. Soustova, I. Matveyv, and Andrey I. Potapov, "Nonlinear, low-frequency sound generation in a bubble layer: Theory and laboratory experiment," *J. Acoust. Soc. Am.* **104**(2), 722-726 (1998).