

수중 공기방울의 선형 배열에 의한 음향 방출

Acoustic radiation from a line array of bubbles in water

최 복 경*, 윤 석 왕*
(Bok Kyoung Choi, Suk Wang Yoon)

요 약

수중에서 공기방울들의 선형 배열에 의해 방출된 음향의 주파수 특성을 이론 및 실험적으로 살펴보았다. 공기방울들의 상호 작용을 고전적 조화진동자의 결합으로 다루었으며, 이론적으로 공기방울들의 선형 배열을 인접한 공기방울들간의 효과만을 고려한 유효 결합 조화진동자 모델로서 제안하였다. 공기방울 중심 사이의 거리가 공기방울 직경의 두 배가 넘는 약한 결합의 경우에 대해, 제안된 유효 결합 조화진동자 모델은 실험 결과들과 잘 일치함을 보여주었다.

Abstract

The frequency characteristics of sound radiated by a line array of bubbles in water was investigated theoretically and experimentally. In the theory we proposed an effective coupled harmonic oscillator model for a line array of bubbles treating the interaction of only adjacent bubbles as the coupling of classical harmonic oscillators. For weak coupling of bubbles that the distance between adjacent bubbles is larger than the diameter of a bubble, the presented theoretical model shows very good agreement with the experimental results.

I. 머리말

수중에서의 공기방울은 물리 음향학적으로 매우 흥미로운 대상으로 인식되어 왔다. 공기방울은 고체 구와는 달리 표면이 자유롭게 움직일 수 있고, 팽창과 수축을 쉽게 할 수 있으며, 팽창과 수축 현상으로 공기방울은 매우 강한 음향 공진 현상을 가지게 된다. 해양에서 공기방울들은 파도, 선박 동력 추진 날개의 회전 등 여러 원인에 의해 주로 해수 표면에 형성되어, 수중음파의 전달에 산란, 흡수, 감쇠 등 많은 영향을 끼치게 되므로, 개개 공기방울 및 공기방울

집단의 음향 현상에 관한 연구는 매우 중요하다. 1917년 Rayleigh[1]가 수중에 형성된 공동(cavity) 파괴 현상의 연구로부터 공기방울 역학이론을 제안한 후로 지금까지 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔다.

수중에서 공기방울들은 각자 자신의 반경에 반비례하는 공진주파수를 가지는 음파를 방출하게 된다. 공기방울이 집단으로 형성되어 있는 경우에 공기방울 집단에 의한 방출음파는 개개 공기방울의 공진주파수보다 낮은 주파수를 가진다는 사실이 최근에 이론 및 실험적으로 연구되었으며[2-4], 이에 따른 방출주파수는 근사적으로 공기방울 집단의 전체 크기에 반비례하고, 공기방울 집단의 공기함유비에 의존한다는 결과가 도출되었다. 그러나, 수십 또는 수백 개의 유한한 갯수로 형성된 공기방울들을 공기방울

*성균관 대학교 물리학과 음향학 연구실
접수일자: 1993년 3월 8일

집단의 해석방식으로 접근하기에는 공기방울들이 함유된 물 전체의 크기 및 공기 함유비를 명확하게 결정하기가 어렵다는 문제가 발생된다. 또한 위에 언급한 논문들에서는 공기방울간의 상호작용에 따른 효과가 고려되지 않았으므로, 본 연구에서는 공기방울의 상호작용을 기초로 하여 이론을 전개하였다. 두개의 진동하는 공기방울에 대한 음향학적 상호작용을 기술한 논문[5]과 1차원 배열을 갖는 공기방울들의 방출 음향에 대한 연구[6:8] 등이 이론적으로 진행되어 왔으나, 공기방울들 간의 간격 및 공기방울 갯수의 함수로 공기방울 배열의 방출 음향 주파수의 변화를 제시할 수 없었다. 그러므로 한개 공기방울의 진동에서 공기방울 집단에 이르는 중간 과정 즉, 인접한 여러개의 공기방울들의 방출 음향 특성에 대한 이론적 접근 및 실험적 연구가 현재 필요한 상태이다.

본 연구에서는 1933년 Minnaert[9]가 한개 공기방울의 진동을 단순 조화진동자로 취급하여 공진주파수 등의 음향 특성을 연구한 고전적 이론을 기본적인 토대로, 각각의 공기방울이 진동할때 방출된 음압이 인접한 공기방울에 서로 영향을 미친다는 가정하에, 공기방울들 사이의 상호 작용을 나타내는 유효 결합 상수를 새로이 도입한 유효 결합 조화진동자 모델을 구성하였으며, 측정값과 비교하였고, 이론과 실험 해석에 나타나는 문제점들을 논의하였다.

II. 여러 공기방울들의 상호작용

1. 한개 공기방울의 단순 조화진동자 모델

물속에서 공기방울은 음향임피던스가 주변매체인 물의 값보다 현격히 작으며, 공기방울의 크기에 따른 특정한 주파수에서 공진현상을 가진다는 특징이 있다. 공기방울이 고유진동수나 또는 그에 가까운 주파수의 음파를 감지하게 되면 그 공기방울은 공진을 일으켜 음파를 강하게 흡수 또는 산란시킨다. 공기방울의 운동이 공기방울 내부 기체의 압축성, 그리고 공기방울이 진동하면서 움직이게 하는 액체의 질량에 관계되며, 감쇠와 표면장력 그리고 열전도의 효과가 없다고 가정하면, 공기방울의 공진주파수를 쉽게 구할 수 있다[10].

공기방울 내부와 물 사이에 열교환이 없다고 가정하여, 단일기체의 상태방정식은 $pV^\gamma = \text{상수}$ 를 이용하여 관계식의 양변을 미분하면 다음과 같다.

$$\frac{dp}{dV} = -\frac{\gamma p}{V} \quad (1)$$

여기서, $dp = p_i = p - P_0$ 로서, p_i 는 공기방울 표면의 순간압력, P_0 는 주변 매질의 평형 압력이며, γ 는 공기방울 내부 기체의 비열비이다. 공기방울의 체적 $V = 4\pi a^3/3$ 와 체적 변화 $dV = 3\pi a^2 \xi$ 를 이용하면,

$$p_i = -\frac{3\gamma P_0 \xi}{a} \quad (2)$$

여기서 a 는 공기방울의 반경, ξ 는 반경 변위이다. 표면장력이 없으면 공기방울 표면 전체에 작용하는 복원력 F_r 은,

$$F_r = 4\pi a^2 p_i = -(12\pi\gamma P_0 a)\xi \equiv -k_0 \xi \quad (3)$$

이 되며, 이는 단순 조화진동자의 운동방정식의 형태를 보인다. 그러므로 공기방울을 단순 조화진동자로 가정한 경우 고유 힘상수 k_0 는

$$k_0 = 12\pi\gamma P_0 a \quad (4)$$

가 된다. 진동하는 대부분의 질량은 기체의 질량보다 공기방울 가까이에 있는 액체의 질량에 기인하게 되는데, 이러한 공기방울 진동의 유효질량 m 을 구하면 [10],

$$m = 4\pi a^3 \rho_0 \quad (5)$$

로 주어지며, 이것은 공기방울 표면 부근의 물이 질량 m 이 진동질량으로 작용한다는 것을 나타낸다. 그러므로 한개 공기방울의 방출 공진주파수 f_0 는 다음과 같이 된다.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_0}{m}} = \frac{1}{2\pi a} \sqrt{\frac{3\gamma P_0}{\rho_0}} \quad (6)$$

이것은 물속의 주변 압력이 1기압인 $P_0 \approx 10^5 [Pa]$ 일 때, 공기방울의 공진 주파수 f_0 (Hz)와 반경 a (m)는 $f_0 \approx 3.3/a$ 의 관계를 가진다. 이와같이 한개 공기방울의 방출진동수는 공기방울의 반경에 반비례하는 (6)식으로 간결하게 표시된다.

2. 여러 공기방울들의 유효 결합 조화진동자 모델

1차원 배열의 같은 크기의 공기방울들은 직렬로 연결된 동일 조화진동자들의 결합으로 생각해 볼 수 있다. 그러나, 물속에 만들어진 공기방울들은 실제로는 얼마간의 거리만큼 떨어져 있고 그들 사이에는 매개체인 물이 있으므로, 그들은 조화진동자들의 단순한 직렬 연결과는 다른 상태이다. 이러한 공기방울들 간의 상호작용을 고려해 보기 위해, 한개의 공기방울이 진동하여 진동 음압이 주위로 퍼져 나가는 경우를 생각하여, x-축상으로 공기방울들의 배열이 1차원인 경우를 고려하면, 한 공기방울로부터 임의의 거리 x에서 음압 p 는 (7)식으로 주어진다.

$$p(x) = \frac{a}{x} P_o(a) \tag{7}$$

여기서 $P_o(a)$ 는 반경이 a 인 공기방울의 공기방울 표면에서의 음압이다. 따라서, 첫번째 공기방울의 표면 전체에 작용하는 힘은 $F_o(a) = 4\pi a^2 P_o(a)$ 로 주어지고, 첫번째 공기방울이 거리 x 만큼 떨어져 있는 같은 크기의 공기방울 표면 전체에 미치는 힘은 $F(x) = 4\pi a^2 p(x)$ 로 나타낼 수 있다. 그러므로 (7)식을 거리 x 에서의 힘 $F(x)$ 로 나타내면,

$$F(x) = \frac{a}{x} F_o(a) \tag{8}$$

여기서 $F_o(a) = F_r = -k_o \xi$ 는 공기방울 벽에서의 복원력과 같게 표현된다. 두 공기방울 중심 사이의 거리가 d 인 경우, 작용되는 힘은

$$F(d) = \frac{a}{d} F_o(a) = -\frac{a}{d} k_o \xi = -k_c \xi \tag{9}$$

로 주어지며, 이것은 d 만큼 떨어진 거리에 있는 공기방울은 옆의 공기방울에 의해 $F(d)$ 만큼의 힘을 받는다는 것을 뜻하며, 여기서 새로 정의된 유효결합상수 k_c 는 다음과 같다.

$$k_c = \frac{a}{d} k_o \tag{10}$$

여기서, 공기방울들 사이에 상호작용은 공기방울의 반경과 두 공기방울간의 거리에 관계됨을 알 수 있다. 각각 고유 힘상수 k_o 를 가지는 공기방울 세개가 그 사이의 상호작용으로 유효 결합상수 k_c 만큼 서로 영향을 받고 있음을 그림 1에 나타내었으며, 공기방울간의 영향은 인접한 공기방울만의 영향이 가장 크

다고 가정하여 이들의 상호작용만을 고려한 운동방정식은 다음과 같다.

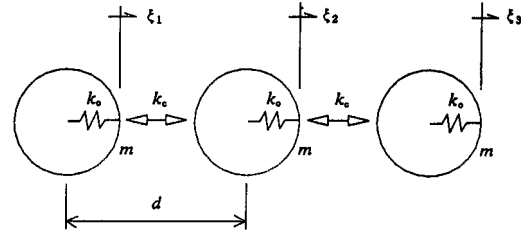


그림. 1. 3개 공기방울인 경우의 1차원 유효 결합 조화진동자 모델. (k_o : 개개 공기방울의 고유 힘상수, k_c : 공기방울들 사이의 유효 결합상수, ξ_1 : 첫번째 공기방울의 반경 변위, m : 공기방울의 진동 유효질량, d : 공기방울들 사이의 거리)

$$\begin{aligned} m \xi_1 &= -k_o \xi_1 - k_c \xi_2 \\ m \xi_2 &= -k_c \xi_1 - k_c \xi_2 - k_c \xi_3 \\ m \xi_3 &= -k_c \xi_2 - k_o \xi_3 \end{aligned} \tag{11}$$

여기서 ξ_1 은 첫번째 공기방울 표면의 진동변위, ξ_2 과 ξ_3 은 각각 두번째와 세번째 공기방울 표면의 진동변위이다. (11)식의 첫번째 식에서 보면, 첫번째 공기방울이 받는 힘은 자신의 진동변위와 인접한 두번째 공기방울의 진동변위에 관계하고 있음을 알 수 있는데, 두번째 공기방울이 첫번째 공기방울에 주는 영향은 유효 결합상수 k_c 에 비례한다는 것이 이 모델의 특징이다. 운동방정식인 (11)식을 행렬형태로 표시하면 다음과 같다.

$$K[X] = \omega^2 M[X] \tag{12}$$

여기서, X 는 공기방울들의 진동형태를 나타내는 고유벡터이며, ω 는 공진 각진동수를 나타내는 고유값이다. K 와 M 은 다음과 같다.

$$K = \begin{bmatrix} k_o & k_c & 0 \\ k_c & k_o & k_c \\ 0 & k_c & k_o \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix} \tag{13}$$

여기서, 힘상수 행렬 K 의 행렬요소를 보면 각 공기방울 사이에 k_c 라는 유효 결합상수가 관계하고 있음을

나타낸다. 운동방정식 (12)식의 해는 $(K-w^2M)[X]=0$ 을 만족하는 고유값 w 와 고유벡터 X 로 주어지고, $f=w/2\pi$ 가 결합 공진주파수로 구해진다. 공기방울들 사이의 거리가 무한대로 떨어져 있는 $d \rightarrow \infty$ 인 경우에는 개개 공기방울의 독립된 진동을 기대할 수 있는데, 이것은 유효 결합상수 k_c 가 0으로 갈수록 공기방울들 사이의 연결상태가 약하다는 뜻이며, 개개 공기방울의 공진주파수로 접근한다. k_c 가 $0 < k_c < k_0/2$ 인 경우에 공기방울들은 유효 결합 진동모드를 가진다.

공기방울 N개가 일차원적으로 이루어진 경우로 확장하면 (13)식은 $N \times N$ 행렬로서 (14)식으로 확장된다.

$$K = \begin{bmatrix} k_0 & k_c & 0 & \dots & 0 \\ k_c & k_0 & k_c & 0 & \vdots \\ 0 & k_c & \ddots & 0 & \\ \vdots & 0 & & k_0 & k_c \\ 0 & \dots & 0 & k_c & k_0 \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} m & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & m & 0 & & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & m \end{bmatrix} \quad (14)$$

N개의 공기방울에 대한 해는 (14)식을 (12)식에 대입하여 N개의 고유값을 구함으로써 유효 결합 조화진동자의 최저 공진주파수를 찾을 수 있다. 일반적으로 주어진 선형 진동계에서는 진동주파수의 최저모드가 가장 잘 들리게 되므로 최저 공진주파수를 관심 주파수로 택하여 분석하였다. 그림 2와 그림 3은 각각 공기방울의 갯수와 공기방울들 사이의 거리에 따른 최저 공진주파수의 변화를 계산한 결과이다. 그

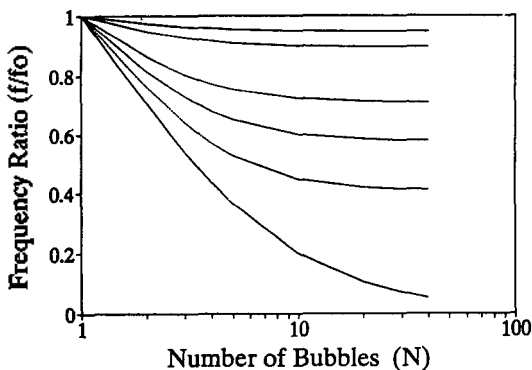


그림 2. 일정한 공기방울 간격에서 공기방울의 갯수 증가에 따른 최저 공진주파수비 f/f_0 의 이론적 변화. (굵은실선: $d/2a=1.0$, 굵은쇄선: 1.2, 굵은점선: 1.5, 쇠선: 2.0, 점선: 5.0, 실선: 10.0)

림 2에서 공기방울의 갯수가 늘어남에 따라 최저 공진주파수가 급격하게 감소함을 알 수 있다. 반면에 공기방울들 사이의 거리가 멀어질수록 갯수 증가에 따라 주파수가 완만하게 감소하는 경향을 보이며, 공기방울의 갯수가 어느 크기 이상이면 각각 일정 주파수에 수렴하는 것을 알 수 있다. 즉, 공기방울의 갯수가 많아질수록 주파수에 미치는 영향이 작아지는 것을 나타낸다. 그러나, 그림 3에서는 공기방울들 사이의 거리가 가까울수록 즉, 공기방울들이 거의 인접해 있는 경우인 $d \approx 2a$ 에서 최저 공진주파수는 현저하게 저주파수로 내려가는 경향을 보인다. 이것은 최저 공진주파수는 공기방울의 갯수보다 공기방울들의 간격에 크게 의존한다는 것을 의미한다.

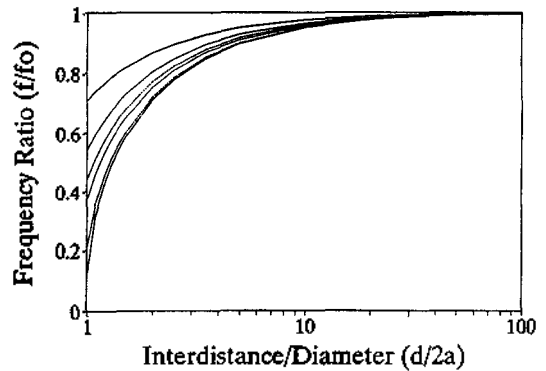


그림 3. 일정한 공기방울 갯수에서 공기방울 간격의 증가에 따른 최저 공진주파수비 f/f_0 의 이론적 변화. (실선: N=2, 점선: 3, 쇠선: 4, 굵은점선: 5, 굵은쇄선: 10, 굵은실선: 20; N은 공기방울의 갯수).

III. 측정방법

측정은 안쪽 벽면이 흡음재로 흡음 처리된 깊이, 너비, 폭이 각각 2m 3m, 2m인 무반향 수조에서 수행하였다. 압축 기체 질소를 미세조질 유량계(Cole-Parmer N062)로 분당 20ml부터 분당 150ml까지 유입 기체의 양을 조절하면서 끝이 단면 처리된 한개의 주사기 바늘로부터 수중으로 공기방울이 분출되도록 하였으며, 수중청음기(B&K 8103)로 수신된 공기방울의 진동 방출 음향을 전하증폭기(B&K 2635)로 증폭한 다음 주파수 스펙트럼 분석기(B&K 2033)로 주파수 및 파형을 분석하였다. 수신된 공기방울의 방출 음파는

주파수 스펙트럼 분석기에서, rectangular window로 주파수대역 0-10kHz, 주파수 분해능 $\Delta f = 25\text{Hz}$ 인 주파수 스펙트럼을 16회 선형평균으로 분석하였다. 그림 4는 공기방울들의 방출 음향 측정장치의 그림이다.

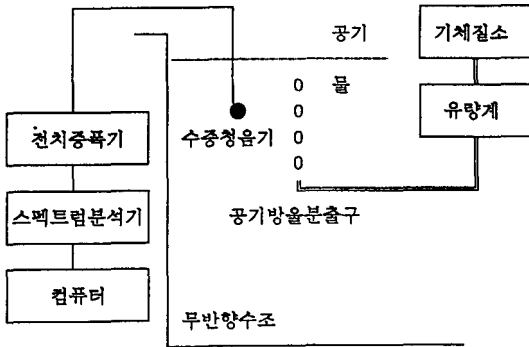


그림 4. 공기방울 진동에 의한 방출음향의 측정장치.

측정방식은 두 종류로 구분하여 실험하였으며, 이를 그림 5에 나타내었다. 방식 A는 공기방울 분출구를 물표면 가까이 위치시켜 공기방울 분출구에서 분출된 공기방울이 한개만 형성되도록 한 조건이며, 방식 B는 공기방울 분출구를 일정한 깊이에서 위치시켜 공기방울들이 연속적으로 수직상태로 형성되도록 한 조건이다. 방식 A와 B로 구분한 이유는 방식 A에서는 공기방울간의 상호작용 효과가 없도록 하기 위해서였다. 공기방울의 크기는 측정하지 않았으며, 방식 A에서 측정된 주파수로부터 공진주파수 관계식 (6)식을 사용하여 반경을 간접적으로 산출하였다. 방식 A와 B 두 경우가 공기방울 분출구의 깊이가 다르므로 깊이에 따른 공기방울 크기 변화를 고려할 필요가 있다. 주입되는 공기의 양을 고정시킨 상태에서, 주어진 공기방울 반경에 대해서 수면과 0.5m 깊이에서의 공기방울 반경의 변화는 이론적으로 수면의 공기방울이 약 1.5%의 반경 증가 변화를 보이며, 이것은 마찬가지로 방출음향 공진주파수에 약 1.5% 주파수 감소 변화를 줄 수 있다. 이러한 변화를 고려한다면 본 측정값의 주파수비는 약 1.5%씩 더 낮아질 것으로 생각된다. 그러나, 이러한 측정되지 않은 임의성을 없애기 위해 측정값의 주파수비를 분석값으로 택하였으며, 각 조건에서 방출되는 공기방울 반경 변화의 영향을 없애기 위해 한개의 공기방울 분출구에

서 연속으로 공기방울을 발생시켜 측정된 주파수(방식 A)와 그 공기방울 개개의 공진주파수를 측정된 주파수(방식 B)의 비를 구하여 이론과 비교하였다.

방식 A에서 수면 아래 공기방울 분출구의 깊이 h_1 은 직경이 22 G(내경 0.41mm)인 주사기 바늘을 사용한 경우와 16 G(내경 1.19mm)인 경우의 모두에 대해 10mm로 일정하게 유지시켰으며, 방식 B에서 분출구의 깊이 h_2 는 22 G의 분출구의 경우는 270mm로, 16G 분출구의 경우는 340mm로 고정하였다. 수중청음기의 깊이는 수면으로부터 150mm, 수중청음기와 공기방울들과의 수평거리는 300mm로 항상 고정하였다. 공기방울의 반경, 공기방울들 사이의 간격 d 와 공기방울의 갯수는 유량이 바뀔 때마다 변하게 되는데, 이 양들은 공기방울 상승시간과 공기방울의 발생시간 간격을 측정함으로써 결정할 수 있었다. 방식 A에서는 공기방울이 1개, 방식 B에서는 공기방울이 여러 개이므로 공기방울의 갯수 또는 공기방울 간격의 변화에 의한 공기방울 상호작용의 음향효과를 보고자 하였다.

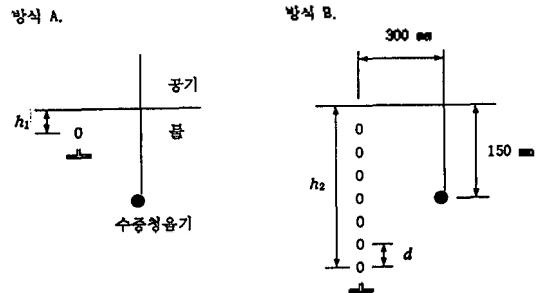


그림 5. 공기방울 진동의 방출음향 측정방식, 방식 A: 한개의 공기방울, 방식 B: 여러개의 공기방울. (h_1 : 방식 A에서 수면아래 공기방울 분출구의 깊이 h_2 : 방식 B에서 수면아래 공기방울 분출구의 깊이, d : 형성된 공기방울들 사이의 평균간격).

IV. 측정결과와 이론의 비교

그림 6은 평균반경 1.6mm인 공기방울의 고유진동 파형(a)과 유입 기체의 양을 일정하게 유지시킨 상태에서 공기방울 4개가 연속적으로 발생될 때 그중 한 공기방울의 결합진동 파형(b)을 보여주고 있다. 고유진동 파형은 전형적인 한개 공기방울의 감쇠 조화진

동 파형을 보여주고 있다. 반면에 결합진동 파형은 일종의 변조된 파형으로 보이며, 파장이 늘어나 있음을 알 수 있다. 그림 7은 그림 6의 주파수 스펙트럼을 보여주며, 최대 음압의 주파수가 저주파수쪽으로 이동된 것을 알 수 있다. 이것은 결합진동으로 나타나는 효과로 해석될 수 있다.

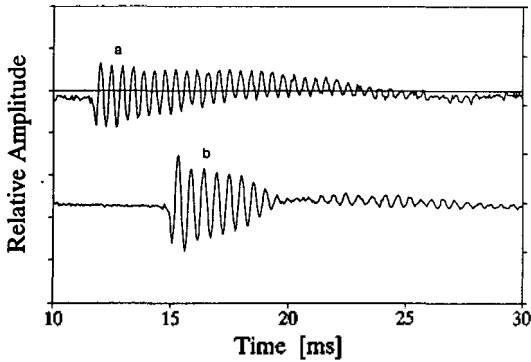


그림 6. 평균반경 1.5mm인 공기방울이 한개만 발생할 때의 고유진동 음향 파형(a)과 4개의 같은 공기방울들이 연속으로 발생할 때의 공기방울 진동의 방출 음향 파형(b).

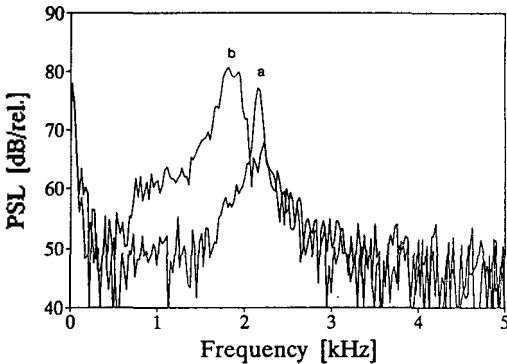


그림 7. 그림 6의 경우에 대응되는 공기방울의 방출 주파수 스펙트럼.

공기방울 간격 변화에 대하여 방출음향의 공진주파수 f 를 개개 공기방울의 공진주파수 f_0 로 나눈 주파수비 f/f_0 를 이론값과 측정값을 비교하여 그림 8에 나타내었다. 십자 표시로된 측정값들은 공기방울의 크기와 공기방울들 사이의 간격이 각 점마다 다른 상태이므로 주파수비로 동일한 다음, 편의상 공기방울

간격의 함수로된 이론값을 실선으로 비교하였다. 전체적으로 이론값과 측정값이 경향이 일치함을 볼 수 있다. 공기방울들 사이의 간격이 좁아질수록 실험값과 이론값이 차이가 남을 볼 수 있는데, 이것은 첫째, 간격이 좁을수록 간격이 미세한 변화에도 주파수의 변화 폭이 크게 나타날 수 있으므로 실험값의 변화는 이러한 실험적인 간격 변화 때문으로 생각할 수 있으며, 둘째, 간격이 좁아질수록 공기방울간의 상호작용이 인접한 공기방울을 넘어서 여러개의 공기방울이 다중으로 영향을 주기 때문인 것으로 생각할 수 있다. 본 논문의 이론 계산에 사용된 (12)식에서 행렬의 크기는 최대 50 x 50 행렬이었으며, 행렬의 대각선 갯수만큼의 공진주파수를 구한 다음 최저 공간주파수를 취하여 실험값과 비교하였다.

V. 논의 및 맺음말

본 실험에서는 공기방울 발생 방식을 두 경우로 구분하였으며, 유입 기체의 양을 일정하게 유지하는 상태에서, 한 경우는 한개의 공기방울을, 다른 한 경우는 동일한 크기의 공기방울을 여러개 잇따라 발생시키기 위해서 고려된 방법이다. 여기에는 다음과 같은 두가지 효과를 고려할 필요가 있다. 첫째, 공기방울을 발생시키는 분출구의 위치가 다르게 되어, 수면 가까이에서 분출구가 위치해 있을 때에는 유입 기체의 양을 일정하게 공급했을 경우 방출되는 공기방울의 반경이 증가할 수 있으며, 본 실험조건인 경우에는 수중에 분출구가 있는 경우보다 1.5%의 반경 증가 효과를 보일 것이며, 이는 주파수가 1.5% 감소되는 것에 대응한다. 이 효과를 계산상으로 고려한다면, 이론값은 실험값에 보다 더 근접하게 된다. 둘째, Oguz와 Prosperetti[11], 그리고 Longuet-Higgins [12]는 수표면 가까이에서 있는 공기방울은 수표면의 음파 반사에 의해 음향 쌍극자 현상(dipole effect)를 보이게 되어, 방출주파수가 고유 공진주파수보다 증가한다는 이론연구를 발표하였다. 이들의 이론결과를 본 실험조건인 경우에 적용하면, 수면 가까이에서 있는 공기방울의 방출 주파수는 5%의 주파수 증가를 보이는 것으로 계산된다. 이 효과와 첫째의 효과를 감안하면, 그림 8에서 유효 결합 조화진동자 모델로 계산된 이론값들은 3.5%씩 아래로 내려가게 될 것이다. 그러나 이러한 고려들은 측정값에서 보듯이, 공기방울의 본 실험의 결과에 큰 영향을 미치지 않으므로, 공

기방울들의 선형 배열에서 방출주파수의 저주파수 편이현상은 공기방울들 사이의 상호작용에 의한 것이라고 판단될 수 있다.

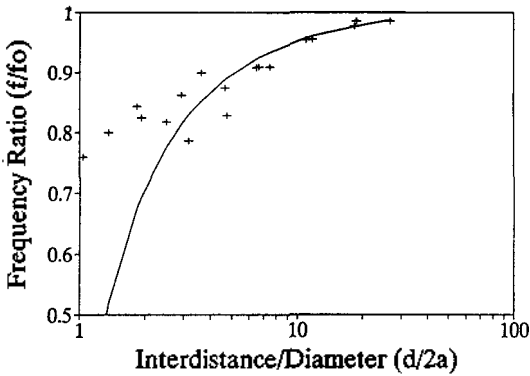


그림 8. 공기방울들 사이의 거리 변화로 나타낸 최저 공진 주파수비 f/f_0 의 변화(+ : 측정값, - : 유효 결합 조화진동 모델).

결론적으로, 공기방울들 사이의 상호작용으로 공기방울들이 방출하는 음파의 주파수가 변화함을 실험으로 측정하였으며, 공기방울들의 약한 결합의 경우에 유효 결합 조화진동자로 가정하여 제안한 이론 모델은 실험 결과들과 잘 일치함을 알 수 있었다. 여기에 사용된 이론적 모델은 각각의 공기방울이 진동할 때 방출된 음압이 인접한 공기방울에 서로 영향을 미친다는 효과를 고려한 모델로서, 본 실험을 통해 타당성 여부가 검증되었다고 평가할 수 있다. 본 모델은 주어진 공기방울에 대해 인접한 공기방울들만의 상호작용만을 고려하였으나, 멀리 떨어져 있는 공기방울들의 미약한 영향도 고려하는 것이 필요하다. 나아가 유효 상호작용모델을 더욱 발전시켜 공기방울 집단의 방출음향 특성 및 음파와의 상호작용을 해석하는데 적용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. Lord Rayleigh, "On the pressure developed in a liquid during collapse of a spherical cavity," *Phil. Mag.* **34**, 94-98, (1917).
2. K.W.Commander and A.Prospereetti, "Linear pressure waves in bubbly liquids: Comparison between

- theory and experiments," *J. Acoust. Soc. Am.* **85**(2), 732-746 (1989).
3. S.W.Yoon, L.A.Crum and A.Prospereetti, "An experimental investigation of bubble clouds as sources of ambient noise," *J.Acoust.Soc.Am.* **86**, S88 (1989).
4. S.W.Yoon, L.A.Crum, A.Prospereetti and N.Q.Lu, "An investigation of the collective oscillations of a bubble cloud," *J. Acoust. Soc. Am.* **89**, 700-706 (1991).
5. W.Thomposon, Jr. and J.M.Reese, "Acoustic coupling between a pulsation and an oscillating sphere," *J. Acous. Soc. Am.* **74**, 1048-1050 (1983).
6. I.Tolstoy and A.Tolstoy, "Line and plane arrays of resonant monopole scatterers," *J. Acoust. Soc. Am.* **87**, 1036-1043 (1990).
7. A.Akay, "Radiation from a finite array of simple sources," *J. Acoust. Soc. Am.* **87**, 1449-1454 (1990).
8. Y.A.IIinskii and E.A.Zaboloskaya, "Cooperative radiation and scattering of acoustic waves by gas bubbles in liquids," *J. Acoust. Soc. Am.* **92**, 2837-2841 (1992).
9. M.Minneart, "On musical air bubbles and the sounds of running water," *Phil. Mag.* **16**, 235-248 (1933).
10. C.S.Clay and H.Medwin, *Acoustical Oceanography: Principles and Applications* (John Wiley & Sons, Inc., N.Y. 1977), pp.194-203.
11. H.N.Oguz and A.Prospereetti, "Bubble oscillations in the vicinity of a nearly plane free surface," *J. Acoust. Soc. Am.* **87**, 2085-2092 (1990).
12. M.S.Longuet-Higgins, "The sound field due to an oscillating bubble near an indented free surface," *J. Fluid Mech.* **221**, 675-683 (1990).

▲최 목 경

1994년 현재 : 성균관대학교 대학원 물리학과 박사과정
 수료
 한국해양연구소 해양물리연구부 위촉
 연구원

▲윤 석 왕 : 12권 5호 참조