

해양에서의 수중소음원으로서 기포군의 집단운동

Collective Oscillations of a Bubble Cloud as a Source of Underwater Ambient Noise in the Ocean

윤 석 왕*, 박 광 준*, L. A. Crum**

(S. W. Yoon, K. J. Park, L. A. Crum)

요 약

해양에서의 비, 바람, 파도 등 표층교란에 의해 수중에 형성되는 기포층은 수 미터 깊이까지 이르며, 이 기포층은 수중 소음을 발생시킬 수 있는 물리적 역학 매체로서 역할이 가능하다. 실험실에서 수중에 기포군을 형성하여 이에 의한 발생 소음을 추적하므로 개개 기포들의 기포군 집단운동에서의 역할을 밝혔으며, 이론적 예측과 실험 기포집단의 모드 진동수가 매우 잘 일치함을 보였다. 이상의 분석결과, 수중 기포군의 집단운동이 수 백 hertz 영역의 수중 소음의 주된 소음원이 될 수 있음을 입증하였다.

ABSTRACT

It is well observed in the ocean that the surface disturbances due to rain, wind and breaking waves generate bubble clouds several meters deep from the water surface. These kinds of bubble clouds can work as a physical mechanism to produce underwater ambient noise. In the laboratory experiment observing the noise generated from a bubble cloud we showed a role of individual bubbles in collective oscillations of a bubble cloud. The experimental data agree very well with the theoretical predictions. These results confirm that the collective oscillations of a bubble cloud is one of the more likely mechanisms for an ocean ambient noise source around several hundred hertz.

I. 서 론

해양에서의 수 백 hertz에서 수 십 kilohertz까지의 수중 소음은 해상에서의 해풍 속력과 매우 좋은 상관 관계를 갖고 있음이 이미 잘 알려져 왔다. [1] 그러나 저주파수 대역의 수중 소음원의 실체는

여전히 불분명하며, Carey[2,3]와 Prosperetti[4,5] 그리고 Lu, Prosperetti, Yoon[6]은 해양에서의 파도 등에 의해 형성된 기포군의 집단운동에 의한 소음 발생의 가능성을 이론적으로 제안하였다. 본 논문에서는 이의 가능성을 실험적으로 입증하고자 한다.

해양에서의 수표면 아래 수 미터까지 많은 기포들이 존재함은 잘 알려져 있다. 이와같은 기포층의 형성 원인들은 비, 바람, 파도 그리고 바다에 사는 생물체 등 매우 다양하나 해표면에서의 파도 등 직접적인 교란이 주된 기포층의 형성원으로 알려져

*성균관대학교 음향학연구소

**U. S. National Center for Physical Acoustics

있다[7]. 이와같은 기포층은 형성하는 개개 기포는 약한 진동자로 취급이 가능하며, 수중에서 반경 a 의 개개 기포의 공진 주파수 f_0 는 다음과 같다[8].

$$f_0 = \frac{1}{2\pi a} \sqrt{\frac{3\gamma P_0}{\rho}} \quad (1)$$

여기서 P_0 는 주변외부압력, ρ 는 물의 밀도, γ 는 기포 내부 기체의 비열비이다. 수중에서 공진주파수가 $f_0=500\text{Hz}$ 인 소음을 방출하기 위해서는 $P_0=10^5\text{Pa}$, $\rho=10^3\text{kg/m}^3$, $\gamma=1.4$ 인 경우 해양에 형성되는 기포들로서는 다소 비현실적인 크기의 기포반경 $a=0.7\text{cm}$ 인 기포들이 수중에 충분히 많은 수기 형성되어야 한다. 이와같은 문제점은 기포군의 집단운동을 결합 진동자의 문제로 다루으로써 해결이 가능하며, 개개 기포의 진동에 따른 공진 주파수에 비하여 기포군의 집단 운동은 현저히 낮은 공진 주파수의 소음을 방출할 수 있다. 또한 이와같은 결론은 수중에 기포가 내포된 상투의 음속이 순수한 물에서의 음속에 비하여 현저히 낮다는 사실로부터도 같은 결론에 도달할 수 있다.

II. 실험방법

1. 실험장치

수중에 일정량의 기체를 함유하고 있는 기포군을 실험적으로 반복하여 만드는 것은 매우 어려운 일이다. 본 실험에서는 이와같은 어려운 점을 해결하는 방법으로, 그림(1)에서와 같은 장치로서 주입공기를 조절하므로 일정량의 공기를 동시에 방출할 수 있는 기포발생기를 이용하여 기포기동을 만들어, 기포집단 내의 공기 함유량과 기포집단의 기하학적 형태를 유지하도록 하였다.

기포집단 내의 공기함유량은 고정밀 유량계를 이용하여 기포발생기에 주입되는 공기량을 정밀 조절함으로써 변화가 가능하다. 기포발생기는 그림(1)에서 보인 단면과 같이 49개의 관이 적각이 되도록 차려진 22G의 노즐들을 1개는 중심에, 그리고 중심원으로 8개, 16개, 24개를 배열하여 만들었으며, 각 중심원의 반경은 각각 2.0cm, 4.0 cm, 6.0

cm이다. 기포발생기에서 발생하는 개개 개포의 반경은 다중 공기유량 조절장치에 의해 각 노즐로 유입되는 공기의 양을 정밀 조절함으로써 1.0mm에서 2.5mm까지 조절이 가능하도록 하였다.

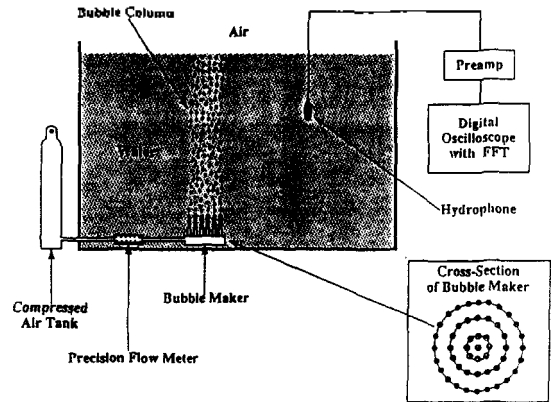


그림 1. 실험 장치도.

2. 실험자료 수집

기포기동의 공진 주파수는 수중청음기(B&K 8103)로 청취된 신호를 전치 증폭기(B&K 2635)를 통하여 FFT 신호처리 분석 기능 및 저장 기능이 내장된 디지털 오실로스코프(LeCroy 9400)로 분석하였다. 수표면에서 기포가 터질때 발생하는 소음과 기포 발생기 자체에서 발생가능한 소음을 배제한 기포기동 자체만에 의한 소음을 측정하기 위하여 수중청음기는 기포기동의 중간길이에 설치하였으며, 실험자료는 $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$ 의 수조에서 측정하였다. 기포 발생기의 각 노즐로부터 발생하는 개개 개포의 평균반경은 1.6mm로 사진 촬영 기법에 의하여 측정되었으며, 개개 개포의 공진 주파수 역시 약 2kHz로 측정되었다.

그림(2)는 디지털 오실로스코프에 내장된 FFT algorithm과 power spectrum averaging 기능을 사용하여 분석된 결과의 예로 십자의 표시는 기포기동의 최저 공진 주파수를 나타낸다. 유입공기량 즉 공기함유량을 증가시키면 공진주파수가 감소함을 볼 수 있다.

최종 분석에 사용된 자료는 Nyquist frequency 1.25kHz, transform size 2500 points로 50개의 power

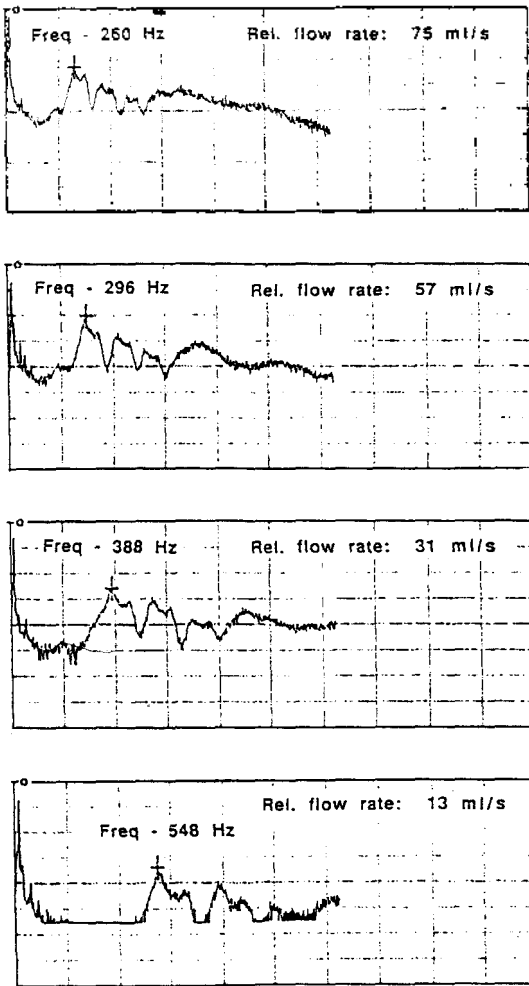


그림 2. 기포기둥의 집단운동에 의한 FFT 주파수 분석 스펙트럼

spectra를 평균한 것으로, 오실로스코프 화면상에서의 관동 분해능은 4Hz로 고정하였다.

III. 이론적 배경

분석에 사용된 이론은 참고문헌[6]에 상세히 기술되어 있어, 여기서는 간략히 기포기둥의 집단운동에 따른 공진을 기술하는 유도된 결과식만을 소개하고자 한다.

수중에 형성된 기포기둥의 기둥면, 즉 순수한 물과 기포 혼합체의 경계면에서 압력의 연속과 수직성분 입자속도의 연속인 경계 조건들, 그리고 수표면과 기포발생기에서의 pressure-release 경계조건을 적용

하면, 기포기둥의 집단운동에 따른 공진을 기술하는 다음과 같은 characteristic equation을 구할 수 있다.

$$x \frac{J_{m-1}(x)}{J_m(x)} = s \frac{H_m^{(2)}(s) - \tilde{H}_m \frac{H_{m-1}^{(1)}(s)}{H_m^{(1)}(s)}}{1 - H_m} \quad (2)$$

여기서

$$x = R_c \sqrt{k_m^2 - \left(\frac{N\pi}{2h}\right)^2}, \quad s = R_c \sqrt{k^2 - \left(\frac{N\pi}{2h}\right)^2} \quad (3)$$

그리고

$$\tilde{H}_m = \frac{H_m^{(2)}(y) - \frac{m}{y}}{H_m^{(2)}(y) - \frac{m}{y}} \frac{H_m^{(1)}(s)}{H_m^{(2)}(s)} \frac{H_m^{(2)}(y)}{H_m^{(1)}(y)} \quad (4)$$

이거시

$$y = R_E \sqrt{k^2 - \left(\frac{N\pi}{2h}\right)^2} \quad (5)$$

이며, J_m , $H_m^{(1)}$, $H_m^{(2)}$ 은 각각 order m 의 Bessel function, first kind Hankel function, second kind Hankel function이며, R_c 는 기포기둥의 반경, R_E 는 원통형으로 가정한 경우 수조의 반경, k_m 은 기포기둥에서의 파수, k 는 순수한 물에서의 파수, h 는 기포기둥의 높이, N 은 모드 수이다. 식(2)의 수치해석에 의한 물어는 참고문헌[6]에 상세히 기술되어 있어, 다음절에서는 계산결과치만을 실험치와 비교 분석한다.

IV. 실험결과 및 분석

1. 공기 함유비

기포기둥의 집단운동에 의한 공진은 개개 기포의 크기, 기포기둥의 크기 및 단위 체적당 공기함유비의 물리적 변수들에 의존 가능하다. 여기서 단위

해석된 공기함유비)는 물과 기포 혼합체의 체적에 대한 공기함유량의 비로서 정의되며, 본 실험자료의 분석에 사용된 단위 체적당 공기 함유비 β 는 기포기둥에 주입되는 단위시간당 공기량 V , 기포발생기로부터 수표면까지 기포가 올라가는 데 걸리는 시간 t , 기포기둥의 유효 단면적 S 와 기포기둥의 길이 h 로 다음과 같이 주어진다.

$$\beta = \frac{Vt}{Sh} \quad (6)$$

개개 기포는 상승시 직선운동이 아닌 나선 또는 지그재그 형태의 상승운동을 하므로 실험에서 측정된 기포기둥의 유효반경은 기포발생기의 실제 반경보다는 크며 사진 촬영기법으로 측정 가능하다. 기포기둥의 유효반경은 기포 발생기의 반경이 6.0cm, 4.0cm, 2.0cm인 경우, 각각 7.0cm, 5.4cm, 4.6cm로 측정되었다.

2. 기포 기둥의 공진

수조에 형성된 기포기둥의 경계조건들은 수표면에서의 pressure-release 경계조건 외에는 기포기둥 안에서의 공기 함유에 따른 음속 감소동에 의한 기포기둥 밖의 물과 기포 기둥안의 임피던스 차, 그리고 기포 발생기에서 조건 등 매우 복잡한 경계조건을 가지게 된다. 특히 기포 발생기에서의 경계조건은 실험조건, 즉, 사용수조의 경계조건과 직접 연관되며, 실험적으로 결정할 수 있다. 작은 수중청음기를 이용하여 기포기둥 내부에서의 압력을 측정하므로 기포 발생기에서의 경계조건은 실측가능하며, 그림(3)은 기포기둥 내부의 실측 압력단면도이다. 그림(3)에서 보이는 것과 같이 수표면에서 85cm 깊이에 위치한 기포발생기에서는 수표면에서와 같이 pressure-release 경계조건임을 알 수 있고, 이와같은 경계조건하에서 이론적으로 최저 공진모드로 가능한 반파장의 sine형태의 압력곡선과 실측자료들이 매우 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

그림(4)는 동일기포 발생기로 형성된 반경이 다른 기포기둥에서의 공기 함유비에 대한 기포기둥의 최저 공진 모드 진동수의 변화를 보이고 있다. 네

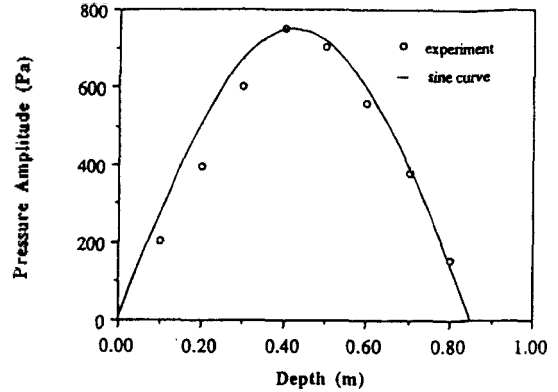


그림 3. 일정한 공기함유 기포기둥 내의 압력 단면도

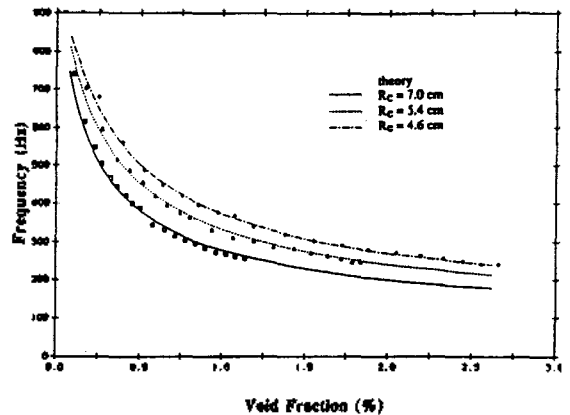


그림 4. 기포 기둥의 공기 함유비에 대한 최저공진모드 진동수의 실험치와 이론예측치

모, 세모, 마름모의 표시는 각각 유효반경 7.0cm, 5.4cm, 4.6cm인 기포기둥에서의 최저 공진모드 진동수의 실측치이며, 실선, 점선, 일점쇄선은 각 경우의 이론 예측치이다. 그림에 나타난 것과 같이 실험자료와 이론적 예측치는 매우 잘 일치하고 있다. 이는 개개의 기포들의 결합에 따른 기포집단의 운동을 결합진동자로서 기술할 수 있으며, 개개 기포의 공진에 따른 발생소음보다 낮은 주파수에서 기포군의 집단운동이 수중 소음원으로서 역할을 할 수 있음을 입증하는 것이다.

V. 결 론

실험실 내에서 실시된 기포군의 집단 운동으로

부터 해면 거품층의 침입하여 거품층의 침탄운동-음향특성, 거품의 침탄운동-음향특성, 해면 거품의 침탄운동-음향특성, 거품의 침탄운동-음향특성, 거품의 침탄운동-음향특성 실험적으로 보였다. 이상의 결과는 수백 hertz 대역에서의 해양 수중 소음을 발생시키는 물리적 매체로서의 거품층에 침입된 거품층의 침탄운동이 수중 소음원으로 작용할 수 있음을 강력히 뒷받침하는 것이다.

감사의 글

본 논문의 저자들은 U.S. Office of Naval Research 의 지원에 의해 이 연구가 가능하였음을 감사한다.

참 고 문 헌

1. G. Wenz, "Acoustic ambient noise in the ocean"

spectra and sources", J. Acoust. Soc. Am. 34, 1936 (1962)

W.M. Carey, "Low frequency ocean surface noise sources", J. Acoust. Soc. Am. 78, S1-S2 (1985).

2. W.M. Carey, "Low frequency noise and bubble plume oscillations", J. Acoust. Soc. Am. 82, S62(1987).

4. A. Prosperetti, "Bubble-related ambient noise in the ocean", J. Acoust. Soc. Am. 78, S2(1985).

5. A. Prosperetti, "Bubble dynamics in ocean ambient noise", in B.R. Kerman (ed.), *Sea Surface Sound*, (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 151-171, (1988).

6. N.Q. Lu, A. Prosperetti and S.W. Yoon, "Underwater noise emissions from bubble clouds", IEEE J. of Oceanic Engr. 15, 275-281 (1990).

7. S.A. Thorpe, "On the clouds of bubbles formed by breaking windwaves in deep water and their role in air sea gas transfer", Phil. Trans. Roy. Soc. (London) A304, 155-210 (1982).

8. M. Minnaert, "On musical air bubbles and the sounds of running water", Phil. Mag. 16, 235-248 (1933)

▲윤 석 왕

1983 : The University of Texas at Austin (Ph.D.)

1978-1980 : 국방과학 연구소 연구원

1981-1983 : The University of Texas at Austin, Applied Research Laboratories, 연구원

1984-1987 : U.S. Naval Postgraduate School, Dept. of Physics, 조교수 및 초빙교수

1989-1990 : The University of Mississippi, Dept. of Physics, 초빙교수 및 U.S. National Center for Physical Acoustics, 책임 연구원

1985-현재 : 성균관 대학교 물리학과 교수

1990-현재 : U.S. National Center for Physical Acoustics, 연구 자문위원 IEEE(Senior Member), Acoustical Society of America (Member)

▲박 광 준

1979 : 성균관 대학교 물리학과 (이학사)

1982 : 성균관 대학교 물리학과 (이학 석사)

1991 : 성균관 대학교 물리학과 (이학 박사)

▲L. A. Crum

1967 : Ohio University (Ph.D.)

1968-1977 : U.S. Naval Academy, Dept. of Physics, 부교수

1978-1987 : The University of Mississippi, Dept. of Physics, 교수

1988-현재 : The University of Mississippi, F.A.P. Barnard 석좌 교수

1990-현재 : U.S. National Center for Physical Acoustics, 연구소 소장 Acoustical Society of America (Fellow)