

수중에 형성된 기포판의 음파투과 실험

최복경, 유석왕

성공관대학교 물리학과 음향학연구소

An Experimental Study of Sound Transmission Through a Bubbly Layer in Water

Bok Kyoung Choi, Suk Wang Yoon

Acoustics Research Laboratory, Dept. of Physics, Sung Kyun Kwan University

요약

해양에서 자연적으로 형성된 기포 또는 기포집단은 그 자체의 공진특성에 의해, 해양에서 사용하는 음파의 전달과정에 여러가지 영향을 미칠 수 있음이 제기되어왔다. 본 실험은 기포집단이 수중에서 음파의 전달과정에 어떤 영향을 주는가를 알아보기 위한 것으로, 수중에 수직형태의 판형기포집단을 발생시켜 1 kHz ~ 100 kHz의 주파수를 가지는 음파를 각각 투과시킴으로써 주파수별 음파전달손실을 측정하였다. 측정결과, 기계 기포의 공진주파수 영역에서 투과손실이 최대가 됨을 알 수 있었고, 그 이하의 주파수영역에서는 기포판의 두께공진모드에 의한 변화가 관측되었으며, 공진주파수 이상의 고주파수영역에서는 주파수 증가에 따라 투과손실이 감소하는 현상을 알 수 있었다.

1. 서론

바닷물속에서는 여러원인으로 인해 극소적으로 많은 기포집단이 발생하며, 이들의 존재는 수중에서의 음파전달에 많은 영향을 미치고 있다. 본 연구에서는 수중에 기포집단을 발생시켜 외부에서 보내진 음파가 기포집단을 투과한 후 어떻게 변화하는가를 알아보고자 하였다. 수중에서 기포집단내의 음파의 특성에 관한 연구로는 1957년 Silberman⁽¹⁾에 의한 실험적 논문이 있으며, 1960년대에 Crespo⁽²⁾가 이론적 해석을 시도한 이후로, 최근 수년간에 걸쳐 Floyd⁽³⁾, Miksis와 Ting⁽⁴⁾, Hall⁽⁵⁾ 등에 의해 본격적으로 논의되었으며, 종합적 연구로서는 Commander와 Prosperetti⁽⁶⁾의 이론적인 연구가 있다. 특히 판형태의 기포집단에 대해서는 Ng와 Ting⁽⁷⁾의 이론적 접근이 있었다. 최근에는 Yoon 등⁽⁸⁾에 의해 기포기포의 소음특성 및 음파산란특성에 관한 이론 및 실험적 연구가 발표된 바 있다. 본 연구에서는 수중에서 판형태를 가지는 기포집단에 대한 음파전달의 물리적 특성변화를 실험적으로 고찰하기 위하여 무반향 수조내에 판형기포집단을 만든 다음, 1 kHz ~ 100 kHz의 음파를

주파수별로 각각 tone burst 형태로 발생시켜 투과계수 및 투과손실의 주파수별특성을 측정하였으며, 이를 3체모델로 근사시킨 이론계산치와 비교하고, 그 차이점을 논의하였다.

II. 이론적 근사모델

1. 기포군합체내의 파동방정식⁽⁶⁾

기포군합체내에서의 기포함유비가 작은 경우에 대해 연속방정식과 운동량방정식은 각각 다음으로 주어질 수 있다.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot u = \frac{\partial \beta}{\partial t} \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla p = 0 \quad (2)$$

여기서 ρ 는 물의 밀도, c 는 물에서의 음속, p 는 기포군합체내의 압력, u 는 입자속도, t 는 시간이다. β 는 기포함유비로서 기계 기포의 모양이 구형이고, 반경이 모두 같다면 $\beta = (4\pi/3)R^3n$ 로 주어지며, R 은 기포의 순간반경, n 은 단위체적당 기포의 갯수이다. (1)식과 (2)식을 고려하면 다음과 같은 파동방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p = 4\pi \int_0^a a^2 R(a, t) f(a, x) da \quad (3)$$

여기서 $f(a, x) da$ 는 x 위치나 이웃에 위치한 평형반경 a 와 $a da$ 사이의 평형반경을 가지는 단위체적당 기포의 갯수를 의미한다. 기포의 동경방향관동을 고려한 Keller 방정식으로 알려진 기포의 진동방정식은 (4)식으로 주어진다.

$$\left(1 - \frac{\dot{R}}{c}\right) \ddot{R} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{\dot{R}}{3c}\right) \dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left(1 + \frac{\dot{R}}{c} + \frac{R}{c} \frac{d}{dt}\right) (p_b - p) \quad (4)$$

여기서 $p = p_b + 2i/R + 4\dot{R}/R$ 로 주어지며, p_b 는 기포와 물과의 경계면에서의 물의 압력, ρ 는 물의 표면장력, μ 는 물의 점성, P 는 기포가 없을 때의 기포에 의해 점유된 위치에서의 물의 압력을 나타내며, \dot{R} 은 기포순간반경의 시간차이분, \ddot{R} 은 2차미분을 표시한다.

또한 기포기계체에 관한 Entalpy 방정식을 도입하자.

$$\frac{1}{\rho} \frac{Dp}{Dt} - \frac{\gamma - 1}{\gamma P} \gamma \cdot (KVT) + \gamma \cdot v = 0 \quad (5)$$

여기서 γ 는 기포 내부기계체의 비열비, K 는 열전도도, T 는 온도, v 는 속도를 표시한다. 기포의 반경과 방출된 음압이 정형적으로 변화한다고 가정하여,

$$R = a(1 + X), \quad p = p_0(1 - \phi X) \quad (6)$$

로 취하면 (여기서 p_0 는 기포내부의 비고압압력으로서 $p_0 = p_0 + 2\sigma/R$ 이고, p_0 는 물에서의 평형상태의 압력이다.), (5)식으로부터 ϕ 는

$$\phi = \frac{3\gamma}{1 - 3(\gamma - 1) \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\gamma} + \frac{1}{2} \coth^2(h(1/\gamma)) \right)^{1/2} - 1} \quad (7)$$

로 주어지며, 여기서 $\lambda = D / \omega a^2$ 이므로, D 는 열확산계수, ω 는 음파의 각진동수, a 는 기포의 평형반경을 나타낸다.

Keller 방정식인 (4)식에 선행조건 (6)식을 넣으면, λ 는

$$\lambda = - \frac{0 / \rho a^2}{\omega a^2 - \omega^2 + 2ib\omega} \quad (8)$$

가 되고, $Q = Q = P - p_0$ 로 주어지는 양이다. 여기서 개개 기포의 공진주파수 ω_0 와 기포진동의 감쇠계수 b 는 다음과 같이 주어진다.

$$\omega_0^2 = \frac{P_0}{\rho a^2} \left\{ \text{Re}(\phi) \frac{2\sigma}{\rho a} \right\} \quad (9)$$

$$b = \frac{2\eta}{\rho a^2} + \frac{p_0}{2\rho a^2} \text{Im}(\phi) + \frac{\omega_0^2 a}{2c} \quad (10)$$

(8)식을 파동방정식인 (3)식에 넣으면 다음의 방정식을 얻게 된다.

$$\nabla^2 Q + k_m^2 Q = 0 \quad (11)$$

여기서 기포혼합체내의 파수 k_m 은 다음으로 주어지며,

$$k_m^2 = \frac{\omega^2}{c^2} + 4m\rho^2 \int_0^{\infty} \frac{af(a)da}{\omega a^2 - \omega^2 + 2ib\omega} \quad (12)$$

기포혼합체내의 음속은 $c_m = \omega / k_m$ 으로 주어진다. 그림 1 은 개개 기포반경이 0.25 mm인 기포집단에 가해준 주파수의 변화에 따른 음속변화와 이론적 계산을 보여주고 있다. 그림 1에서보면 기포공진주파수 [$f_0 = 3.3/\pi = 13.5$ kHz]보다 낮은 주파수에서는 기포혼합체내의 음속이 급격하게 감소된 값을 보이며, 공진주파수에서는 더욱 급속히 떨어지는 현상을 보인다. 또한, 공진주파수이상은 급속히 음속이 증가하였다가 고주파영역에서 다시 물에서의 음속값으로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 이것은 다음과 같은 음속의 일반적인 경의로부터 설명될 수 있다. Γ 는 유체의 압축율을 표시한다.

$$c^2 = \frac{1}{\rho \Gamma}$$

기포혼합체의 경우에 낮은 주파수에서는 Γ 가 물에서의 값보다 크며, 기포공진주파수에서는 현격하게 작아진다. 공진주파수를 지나서는 기포진동의 위상이 음압의 위상에 대해 위상연성이 일어나 Γ 가 작아지게 되고, 그러므로 음속이 현저하게 증가하게 된다.

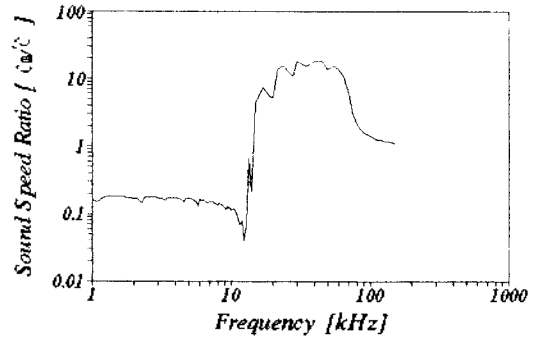


그림 1. 기포혼합체 내에서의 주파수별 음속곡선 (기포함유비 0.19 %, 기포반경 0.25 mm) (c_m : 기포혼합체내의 음속, c : 물에서의 음속)

2. 기포판의 투과계수의 계산

기포혼합체가 파포양의 형태로 이루어져 있을 때, 평균두께가 d 인 기포판은 다음과 같은 3체문제도 생각할 수 있다.

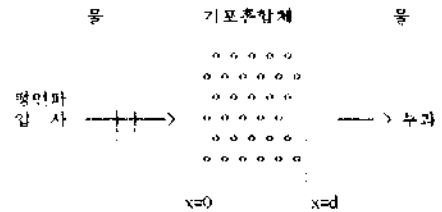


그림 2. 기포판의 3체 모델

위의 상태에서 기포혼합체내에 기포가 균일하게 분포하고 있다고 가정하고,

$$u^0 \cdot n = u \cdot n \quad (13)$$

$$p^0 = P \quad (14)$$

경계면상에서의 경계조건인 입자속도 연속조건(13)과 음압 연속조건(14)을 적용하면 (여기서 첨자 0은 물의 상태를 나타내며, n 은 기포판의 법선단위벡터이다.), 압력투과계수 T 는 다음으로 주어진다.

$$T = \frac{\exp(ikd)}{\cos kd + 1/2(c/c_m + c_m/c) \sin kd} \quad (15)$$

여기서 k 는 파수, c 는 음속을 나타내는데, 첨자 m 은 기포혼합체내를, 무첨자는 물에서의 상태를 표시한다. d 는 기포판의 평균두께를 나타낸다. 그러면, 이로부터 투과손실 (TL: Transmission Loss)은 (15)식으로부터 주어지게 된다.

$$TL = 20 \log(1/T) \quad (16)$$

III. 실험장치 및 방법

장방경 3.0 m, 단방경 2.5 m, 길이 2.0 m인 타원형의 무반향 수조 내에서 그림 3과 같이 실험장치를 설치하고, 정현파를 실은 tone burst를 1초 간격으로 발생시켜 실험하였다.

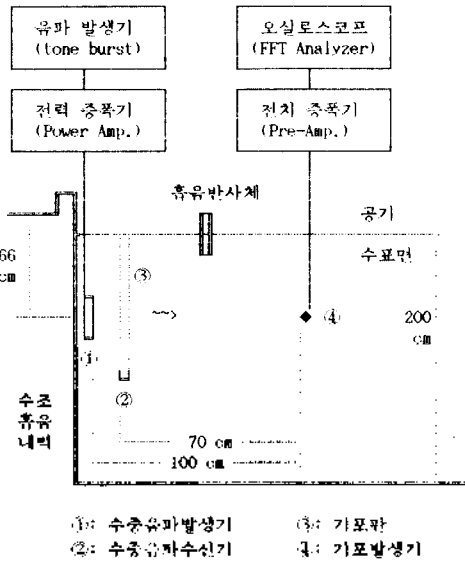
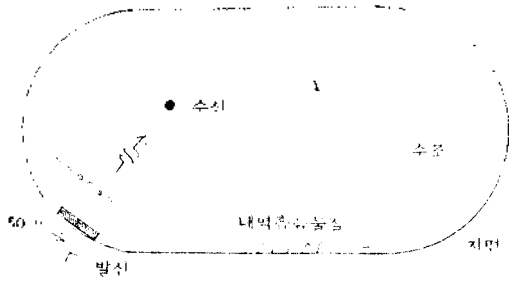


그림 3. 수조내 실험장치 평면도 및 단면도

수중음파발생기는 Acctran Type AF33으로 1 kHz ~ 150 kHz 까지 음파를 발송시킬 수 있으며, 수중음파수신기는 DC ~ 300 kHz까지 수신 진폭특성이 평탄한 Celestec Type LC10을 사용하였다. 기포발생기로는 압축기체를 이용한 미세기포문 사기를 사용하였으며, 기포의 반경이 0.25 μm 이하인 기포들 까지도 발송시킬 수 있었으며, 기포의 평균크기 및 분포는 사진관측으로 측정하였다. 수중음파발생기의 근거리음장이 주파수별분포에 따라 10 ~ 20 cm 이내로 측정되었으므로, 기포관을 수중음파발생기로부터 30 cm에 위치시켜 원거리음 장조건을 만족하도록 하였다. 또한 수표면반사파를 제거하 기 위해 흡음판사판을 수직으로 수표면으로부터 아래로 15 cm 길이까지 실험적으로 결정하여 설치하였다.

음파발생기에서 tone burst를 발생시키고, 출력기를 거쳐 수중음파발생기로 수중에 음파가 방사되니, 기포관을 투과 한 음파는 수중음파수신기로 수신되고, 전치증폭기로 증폭 된 다음, 오실로스코프에서 수신된 파형의 진폭을 기록하 였다. tone burst에 실험 파형의 갯수는 20 ~ 40개로 주파 수에 따라 조절하였으며, tone burst에 실험 음파의 주파수

를 1 kHz 부터 100 kHz 까지 200 Hz단위로 바꾸면서 발송시 킷다. tone burst의 발송시간 간격은 1 초간격으로 충분히 발송간격을 두도록써 수조내벽면에서 미세하게 발송되는 반 사파를 동일 수 있었다.

5. 측정결과 및 논의

측정시 유량은 733 ml/min으로서 고정밀유량계로서 측정 하는 동안 일정하게 유지시켰으며, 기체는 압축실기체를용 사용하였다. 사진으로 측정된 기포관의 크기는 길이 66 cm, 폭 50 cm, 유효두께(너비)가 4 cm였다. 기포함유비는 기포 들이 체적을 기포관의 전체체적으로 나누어 값으로 정의되며, 다음식으로 산정할 수 있다.

$$R = \frac{Gt}{V}$$

여기서 G는 유량, t는 기포가 발송된 곳으로부터 수표면까 지 도달하는데 걸리는 시간, V는 기포관의 전체체적이다. 본 실험에서의 기포함유비는 약 0.13 %로 산정되었다. 또한 사진측정결과 기포의 평균반경은 약 0.25 μm 였으며, 이 반경 을 가지는 기포의 공진주파수는 13.5 kHz에 해당한다.

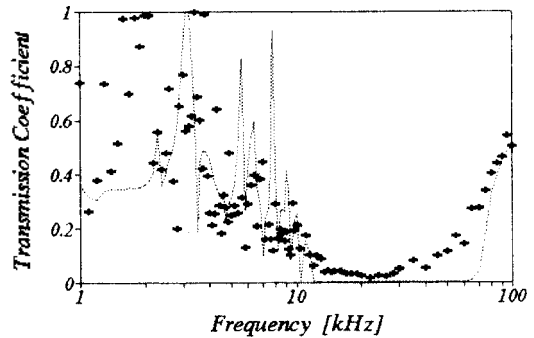


그림 4. 기포관의 투과계수의 측정값 및 이론값 (+ : 측정값, — : 이론값)

그림 4는 측정된 투과계수와 이론적 계산값을 주파수의 함수로 보여주고 있다. 기포관의 두께공진모드가 개개 기포 의 평균반경이 2.5 μm 로 측정된 기포의 공진주파수 이하의 주파수($f < 13.5 \text{ kHz}$)영역에서 나타나고 있음을 알 수 있는 데, peak값들은 투과가 잘되는 주파수영역을 나타낸다. 실험자료와 이론자료가 정확히 일치하고 있지 않은 데, 이것 은 기포관이 두께가 수시로 변하게 되고 경계면이 이론에서 와 같이 명확히 구분되는 것이 아니기 때문에 나타나는 불 일치도 볼 수 있다.

그림 5는 측정된 투과계수로부터 계산한 투과손실과 이 론적 계산값을 주파수의 함수로 보여주고 있다. 기포공진주 파수(13.5 kHz)부근에서 투과손실이 크게 나타나고 있는 데, 이것은 그 주파수 부근에서 강한 산란이 일어나 투과손 실이 커지는 것으로 해석할 수 있다. 이론적인 자료는 13.5

kHz에서 아주 큰 투과손실을 보이지만, 측정결과는 그렇게 큰값에 미치지 못하며, 단지 그 영역(13 ~ 30 kHz)에서 투과손실이 강하게 나타나는 경향만을 보인다. 이것 또한 이론모델이 가지고 있는 단점으로 생각되며, 추후 보완되어야 할 것으로 생각된다.

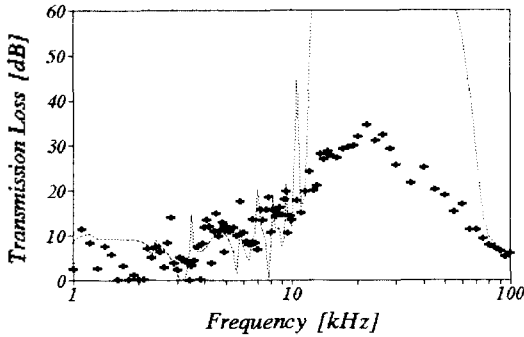


그림 5. 기포판의 투과손실의 측정값 및 이론값
(· : 측정값, — : 이론값)

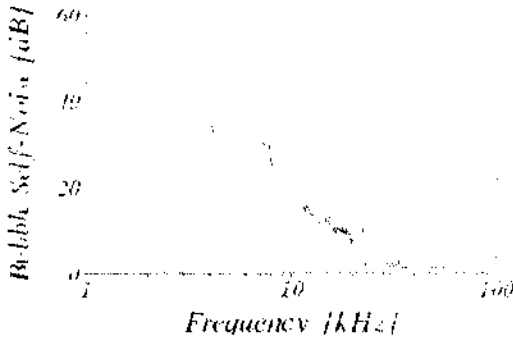


그림 6. 기포판의 자체소음 (self noise)에 대한 주파수 스펙트럼.

그림 6은 기포판에서 자체적으로 방출된 자체소음 (selfnoise)의 측정된 주파수 스펙트럼을 보여주고 있다. 10 kHz이하 영역에서 큰 peak들이 보이고 있으며, 이것은 기포집단진동으로 인한 집단진동 주파수영역으로 해석할 수 있다. 개개 기포의 공진주파수(13.5 kHz)에서는 값이 낮은 상태에서 작은 peak가 보일 뿐인데, 이것은 기포들이 집단진동모드로 진동하고 있어서 상대적으로 진폭이 우세한 집단진동주파수(1 ~ 3 kHz)영역에서만이 여러개의 공진 peak가 나타나게 된 것으로 해석할 수 있다.

V. 결 론

본 실험은 기포집단이 수중에서 음파의 전달과정에 어떤 영향을 주는가를 알아보기 위한 것으로, 수중에 수직형태의 판형 기포집단을 발생시켜 1 kHz ~ 100 kHz 의 음파를 주

파수별로 각각 투과시킴으로써, 주파수별 음압투과계수를 측정하고 이로부터 음파전달손실을 구하였는데, 실험적 결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째, 개개 기포의 공진주파수 [f = 13.5 kHz]부근에서 투과손실이 최대가 되는 것이 측정되었다. 둘째, 그 이하의 주파수영역 [f < 13.5 kHz]에서는 기포판의 두께공진모드에 의한 변화가 관측되었다. 셋째, 그 이상의 주파수영역 [f > 13.5 kHz]에서는 주파수 증가에 따라 투과손실이 감소하는 현상을 알 수 있었다. 넷째, 기포판의 자체소음에 대한 측정된 주파수스펙트럼과 비교해보면, 저주파수영역 [f < 13.5 kHz]에서는 투과계수의 실험결과와 유사하지만, 개개 기포의 공진주파수 [f = 13.5 kHz]부근에서는 자체소음이 우세하게 관측되지 않는다는 사실을 알 수 있는데, 이것은 개개 기포의 진동방출음압이 기포집단의 집단진동방출음압보다 상대적으로 매우 약하기 때문으로 생각된다. 본 측정결과와 근사적인 이론모델의 이론계산 결과는 개개 기포의 공진주파수영역에 대해서 투과손실폭이 현격하게 차이를 보임을 알 수 있었으므로, 기포공진주파수 영역에 대해서는 본 이론모델은 수정되어야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. E. Silberman, "Sound velocity and attenuation in bubbly mixtures measured in standing wave tubes," J. Acoust. Soc. Am. 29, 925-933 (1957).
2. A. Crespo, "Sound and Shock Waves in Liquids Containing Bubbles" Phys. of Fluids Vol. 12, 2274-2281 (1960).
3. E.R. Floyd, "Thermodynamic corrections to the velocity of propagation in a bubbly medium" J. Acoust. Soc. Am. 70(6), 1748-1751 (1981).
4. M. J. Miksis and Lu Ting, "Viscous effects on wave propagation in a bubbly liquid" J. Acoust. Soc. Am. 30(6), 1683-1689 (1987).
5. M. V. Hall, "A comprehensive model of wind-generated bubbles in the ocean and predictions of the effects on sound propagation at frequencies up to 40 kHz" J. Acoust. Soc. Am. 86(3), 1103-1117 (1989).
6. K. W. Commander and A. Prosperetti, "Linear pressure waves in bubbly liquids: Comparison between theory and experiments" J. Acoust. Soc. Am. 85(2), 732-746 (1989).
7. K. C. Ng and L. Ting, "Wave propagation through a thin bubbly layer" J. Acoust. Soc. Am. 79(4), 924-926 (1986).
8. S. W. Yoon, L. A. Crum, A. Prosperetti and N. O. Lu, "An investigation of collective oscillations of a bubble cloud," J. Acoust. Soc. Am. 89, 700-706 (1991).