

# 무한 평판 주위에 형성된 수중 기포층의 방사소음 감소 효과

## Noise Reduction Effect of an Air Bubble Layer on an Infinite Flat Plate

김 중 철† · 오 준 석\* · 조 대 승\*\*

Jong Chul Kim, Joon Seok Oh and Dae Seung Cho

(2006년 11월 30일 접수 ; 2007년 1월 26일 심사완료)

Key Words : Air Bubble(기포), Bubble Layer(기포층), Bubble Fluid(기포유체), Radiation Noise(방사소음), Infinite Flat Plate(무한평판)

### ABSTRACT

The mixture sound speed in bubbly fluids is highly dispersive due to differences of the density and compressibility between bubbles and fluids. The dispersion range in bubbly fluids expands to a higher frequency than the resonance frequency of an air bubble. A theoretical model was developed to compute the reduction of radiation noise that is generated by a force applied on an infinite flat plate using a bubble layer as a compliant baffle. For evaluating the effectiveness of a bubble layer in reducing the structure-borne noise of an infinite elastic plate, the noise reduction levels for various parameters such as the thickness of bubble layers, the volume fractions and the distribution types of bubbly fluids are calculated numerically. The noise reduction effect of an air bubble layer on an infinite flat plate is considerable level and similar to the tendency of dispersion of bubbly fluids. It is recommended that the thickness of a bubble layer should be increased with keeping an appropriate volume fraction of an air bubble for the most effective reduction of the radiation noise.

### 1. 서 론

해양에서의 수중기포는 기포내부의 공기의 밀도와 압축률이 해수와 비교하여 큰 차이가 있기 때문에 매우 미소하게 해수에 포함되어 있더라도 해양과의 산란, 전파 등에 많은 영향을 미친다고 알려져 있다<sup>(1)</sup>. 이러한 기포속의 기체와 해수 밀도의 다름으로 인한 음속의 분산성을 이용하여 수중으로 방사되는 소음을 감소시키는 분야에 수중기포를 적용하기도 하고, 해양 구조물의 수중 작업시 수중으로 전파하는 충격

성 소음을 감소시키기 위해 압축공기와 고무호스를 이용하여 기포층을 형성시켜 소음을 감소시키는 방법이 제안되기도 하였다<sup>(2,3)</sup>.

수중 음파의 전달에 있어서 기포 유체와 단일 유체에서의 가장 다른 점은 음속 구조의 변화이다. 기포 유체에서는 음속이 주파수 성분에 따라 뚜렷한 차이를 가지는 분산성 특성으로 인하여 음향손실이 크게 일어나기 때문에 이를 고려한 많은 연구들이 진행되었다<sup>(4,5)</sup>.

이러한 기포 유체에서의 음속 변화에 대한 연구로서 wood가 기포 속의 기체가 등은 과정이라는 가정하에 압축률과 밀도의 변화를 이용하여 음속을 계산하는 식을 제안하였다<sup>(6)</sup>. 이 식은 기포의 체적성분비에 의해 좌우되는 밀도와 압축률만 고려하기 때문에 분산성 특성을 나타내지 못하여 기포의 공진주파

† 책임저자; 정희원, 국방과학연구소 제2체계개발본부

E-mail : jckim@add.re.kr

Tel : (055)540-6821, Fax : (055)542-3737

\* 국방과학연구소 제2체계개발본부

\*\* 정희원, 부산대학교 조선해양공학과

수 보다 훨씬 낮은 저주파수 대역의 음속을 표현하는 데 사용되고 있다.

주파수 대역과 상관 없는 일반화된 기포 유체의 음속에 대해서는 K. W. Commander와 A. Prosperetti가 기포유체에서 음파의 전달 모델을 Van Wijngaarden이 제안한 식을 이용하여 선형적으로 유도하였다<sup>(7)</sup>. 이들이 제안한 식은 기포의 체적비가 일정한 영역에서 기존의 실험결과와 잘 일치하는 것을 확인하였다. 현재에는 이들이 제안한 기포유체에서의 분산성을 나타내는 모델이 널리 사용되고 있다. 또한, P. S. Wilson은 이들의 모델식을 이용하여 저주파수 대역에서도 5% 정도의 분산성이 있음을 예측하고 Ruggles의 실험자료를 이용하여 계산결과와 큰 차이가 없음을 확인하였다<sup>(8,9)</sup>.

기포층에 의해 주위 유체로부터 분리되어 있는 평판에 외력이 가해질 때 방사되는 소음의 손실에 대한 모델링은 M. C. Junger 등에 의해 제시되기도 하였다<sup>(10)</sup>. 그는 기포의 공진주파수에 대응하는 기포 체적을 이용하여 기포유체의 평균 압축률과 파수를 구하여 분산성을 확인하였으며, Feit의 무한평판의 방사소음 정식화 식 (11)과 경계조건을 이용하여 기포층이 있는 경우와 없는 경우의 소음 손실량을 계산하여 기포층에 의한 방사소음 감소 효과를 확인하였다.

이 연구에서는 평판 주위에 형성된 기포층의 수중 방사소음 감소 영향을 확인하기 위하여 기포유체를 하나의 균질한(homogeneous) 유체라 가정하고, 각종 실험에 의하여 기포유체의 음속에 대한 실험효성이 입증된 K. W. Commander와 A. Prosperetti의 제안식을 이용하여 다양한 기포 분포에 따른 분산성 특성을 확인하였다. 또한, S. H. Ko 등이<sup>(12)</sup> 제안한 평판 주위의 baffle 모델링 방법을 이용하여 무한 평판 주위에 형성된 기포층을 compliant baffle로 단순화하여 수중으로 방사되는 소음의 감소 효과를 모델링하였다. 이를 위하여 탄성 평판의 파동식을 이용하여 평판의 변위와 응력을 구하고<sup>(13,14)</sup> 평판에 접하고 있는 기포유체와 해수에서의 파동방정식을 이용하여 압력을 구한 후, 각 매질 사이의 경계조건을 이용하여 기포층이 있는 경우와 없는 경우의 방사소음 감소량을 정식화하였다. 또한 이러한 모델링 식을 이용하여 기포 크기에 따른 분포 형태, 체적성분비 및 기포층 두께 등 다양한 분포특성에 따라 소음 감소 효과를 고찰하였다.

## 2. 기포층에서의 음속변화

### 2.1 저주파수 대역에서 기포층의 음속

기포를 둘러싸고 있는 막의 표면장력을 고려하여 기포의 내부 압력( $P_{b,e}$ )과 기포 주변의 정압력( $P_\infty$ )과의 관계를 수식으로 표현하면 다음 식과 같다.

$$P_{b,e} = P_\infty + \frac{2\sigma}{a} \quad (1)$$

여기서,  $\sigma$ 는 기포의 표면장력,  $a$ 는 기포의 반경이고,  $(2\sigma/a)$ 항은 Laplace 압력으로 주변의 압력에 비하여 미소하므로 무시 가능하다<sup>(8)</sup>. 한편, 기포 유체에서 기포의 체적성분비를  $\beta$ 라 두면,  $\beta = V_g/V_m$ 으로 표현된다. 여기서  $V_m$ 은 유체 체적( $V_l$ )과 기체 체적( $V_g$ )의 합이다. 그러므로, 기포층에서의 밀도  $\rho_m$ 과 압축계수  $x_m$ 은 다음 식으로 표현된다.

$$\rho_m = (1-\beta)\rho_l + \beta\rho_g \quad (2)$$

$$x_m = (1-\beta)x_l + \beta x_g \quad (3)$$

여기서,  $\rho_l$ 과  $\rho_g$ 는 각각 유체와 기체의 밀도이고,  $x_l$ 과  $x_g$ 는 각각 유체와 기체의 압축계수이다.

기포의 공진주파수 보다 훨씬 낮은 주파수 대역에서는 기포는 등온과정으로 간주될 수 있으므로, 각 기포 응답은 기포내 기체의 압축성에 의해 주로 영향을 받는다. 그러므로 음속, 밀도 및 압축계수와의 관계와 식 (1)~(3)에 의해 기포유체에서의 음속은 다음 식과 같이 유도된다<sup>(8)</sup>.

$$c_m = \sqrt{\frac{1}{[(1-\beta)\rho_l + \beta\rho_g][(1-\beta)x_l + \beta x_g]}} \quad (4)$$

공진주파수 보다 낮은 주파수 대역에서 기포의 표면장력과 소산효과를 무시할 수 있기 때문에, 유체와 기체의 두 혼합체의 밀도와 음속의 관계로 표현이 가능하다. 따라서, 기포층의 음속( $c_{mf}$ )은 다음 식과 같이 표현된다. Fig. 1은 체적성분비의 변화에 따른 해수의 음속을 표시한 것이다.

$$\frac{1}{c_{mf}^2} = \frac{(1-\beta)^2}{c_l^2} + \frac{\beta^2}{c_g^2} + \beta(1-\beta) \frac{\rho_l^2 c_g^2 + \rho_g^2 c_l^2}{\rho_l \rho_g c_l^2 c_g^2} \quad (5)$$

2.2 고주파수 대역에서 기포층의 음속

음향주파수가 증가됨에 따라 기포의 동적 거동이 점점 활발해지고 단일과정이 된다. 주변유체에서의 음파의 속도를  $c_p$ , 점성계수를  $\mu$ 라 하고, 이 유체가 열확산계수  $D_g$ 와 비열비  $\gamma$ 를 가진 기포를 포함하고 있고, 균질한 혼합체로 취급한다면 기포 층에서의 음속  $c_m$ 은 다음과 같이 표현된다<sup>(7)</sup>.

$$\frac{c_m^2}{c_p^2} = 1 + 4\pi c_p^2 \int_0^\infty \frac{an(a)da}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2ib\omega} \quad (6)$$

여기서,  $\omega$ 는 원진동수,  $\omega_0$ 는 기포의 공진주파수,  $n(a)da$ 는 기포의 반경  $a$ 와  $a+da$ 사이의 반경을 가진 기포의 단위체적당 수량을 나타내고, 기포의 댐핑 계수  $b$ 는 다음 식으로 표현된다. 기포의 공진주파수는 기포의 크기와 주변의 압력에 의해 결정된다<sup>(15)</sup>.

$$b = \frac{2\mu}{\rho_p a^2} + \frac{P_{be}}{2\rho_p a^2 \omega} \text{Im}(\phi) + \frac{\omega^2 a}{2c_l} \quad (7)$$

식 (7)의 각각의 항은 점성, 열전도 및 음향에 의한 소산 효과를 나타내고,  $\phi$ 는 다음 식과 같다.

$$\phi = \frac{3\gamma}{1 - 3(\gamma - 1)iX[(i/X)^{1/2} \coth(i/X)^{1/2} - 1]} \quad (8)$$

여기서,  $X = D_g/\omega a^2$ 로 정의한다. 따라서, 기포층에서의 파수는 다음 식과 같이 표현된다.

$$k_m^2 = \frac{\omega^2}{c_l^2} + 4\pi\omega^2 \int_0^\infty \frac{an(a)da}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2ib\omega} \quad (9)$$

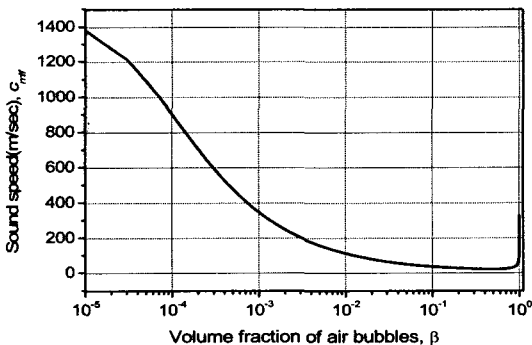


Fig. 1 Sound speed for low frequency in bubbly sea water

식 (9)는 단일 크기의 기포뿐만 아니라 기포의 크기와 분포가 일정하지 않은 경우에 적용할 수 있는 일반화된 식으로, 기포 집단의 특성에 따라 기포층에서의 파수를 구할 수 있다.

3. 평판 주위 기포층의 음향모델

무한평판 주위에 형성된 기포층에 의해 평판에서 방사되는 음압의 감소량을 계산하기 위하여 기포층을 하나의 compliant baffle로 볼 수 있으며, Fig. 2와 같이 무한평판, 기포층 및 해수로 단순하게 구성할 수 있다. 무한 탄성평판의 내부는 선 기진력(line excitation force)로 가진되고 있으며, 평판외부는 균질한 기포유체가 분포하고 외부는 해수로 둘러싸여 있다고 가정한다. 먼저, 해수에서 음파의 지배방정식은 다음과 같이 표현된다<sup>(12)</sup>.

$$\frac{\partial^2 p_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p_0}{\partial z^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p_0}{\partial t^2} \quad (10)$$

여기서,  $p_0 = p_0(x, z, t)$ 는 음압,  $c_0$ 는 해수에서 음파 속도,  $t$ 는 시간,  $x$  및  $z$ 는 공간좌표이다. 음압  $p_0$ 는 역푸리에 변환식으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p_0(x, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P_0(k_x, \omega, z) \times \exp[-i(kx - \omega t)] dk_x d\omega \quad (11)$$

여기서,  $k_x$ 는  $x$ 축 방향의 파수이다. 식 (11)을 식 (10)에 대입하여 정리하면 식 (12)와 같다.

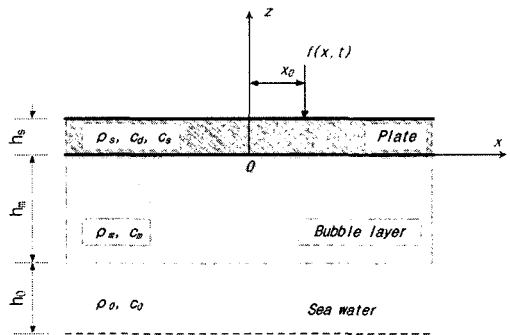


Fig. 2 Geometry of an infinite plate and a bubble layer

$$\frac{d^2 P_0}{dz^2} - \alpha_0^2 P_0 = 0 \quad (12)$$

$\alpha_0 = (k_x^2 - k_0^2)^{1/2}$ ,  $k_0 = \omega/c_0$ 는 음파의 파수이다. 식 (12)의 해를 구하면,

$$P_0(k_x, \omega, z) = A_0(k_x, \omega) \exp(\alpha_0 z) \quad (13)$$

$[z \leq -h_m]$

여기서,  $A_0(k_x, \omega)$ 는 결정되어야 할 미지계수이다. 기포층에서의 음파의 지배방정식은 다음 식과 같다.

$$\frac{\partial^2 p_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p_m}{\partial z^2} = \frac{1}{c_m^2} \frac{\partial^2 p_m}{\partial t^2} \quad (14)$$

여기서,  $p_m = p_m(x, z, t)$ 은 기포층에서의 음압을 나타내고,  $c_m$ 은 기포층에서의 음속이다. 기포층에서의 음압은 역푸리에 변환식으로 다음과 같이 표현된다.

$$p_m(x, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P_m(k_x, \omega, z) \times \exp[-i(k_x x - \omega t)] dk_x d\omega \quad (15)$$

식 (15)를 식 (14)에 대입하면 식 (16)과 같다.

$$\frac{d^2 P_m}{dz^2} - \alpha_m^2 P_m = 0 \quad (16)$$

여기서,  $\alpha_m = (k_m^2 - k_x^2)^{1/2}$ ,  $k_m = \omega/c_m$ 는 기포층에서 음파의 파수이다. 식 (16)의 해를 구하면 다음 식으로 표현된다.

$$P_m(k_x, \omega, z) = A_m(k_x, \omega) \cos(\alpha_m z) + B_m(k_x, \omega) \sin(\alpha_m z) \quad (17)$$

한편, 평판에서 전파되는 탄성파의 지배방정식은 다음과 같이 표현된다<sup>(13,14)</sup>.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = \frac{1}{c_d^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (18)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (19)$$

여기서,  $\phi$ 는 스칼라 포텐셜(scalar potential),  $\psi$ 는 벡터 포텐셜(vector potential)이고,  $c_d$ 와  $c_s$ 는 평

창파의 속도(dilatational wave speed)와 전단파의 속도(shear wave speed)를 각각 나타낸다. 따라서, 탄성 평판의 법선 및 접선 방향의 변위 및 응력은 다음 식과 같이 표현된다.

$$u_z(x, z, t) = \frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (20)$$

$$u_x(x, z, t) = \frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (21)$$

$$\tau_{zz}(x, z, t) = (\lambda_s + 2\mu_s) \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right) - 2\mu_s \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + 2\mu_s \frac{\partial^2 \psi}{\partial z \partial x} \quad (22)$$

$$\tau_{zx}(x, z, t) = \mu_s \left( 2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial z} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \right) \quad (23)$$

여기서,  $\lambda_s = E\nu/(1+\nu)(1-2\nu)$ ,  $\mu_s = E/2(1+\nu)$ 이고,  $E$ 는 탄성계수(Young's modulus),  $\nu$ 는 푸아송비(Poisson's ratio)이다.

평판의 내부에서 단위면적당 가진력  $f(x, t)$ 로 가진다면, 평판의 내부, 외부 그리고 기포 경계층에서는 다음 식과 같은 경계조건을 만족한다.

$$(\tau_{zz})_{z=h_s} = -f \quad (24)$$

$$(\tau_{zx})_{z=h_s} = 0 \quad (25)$$

$$(\tau_{zz})_{z=0} = -(\dot{p}_m)_{z=0} \quad (26)$$

$$(\tau_{zx})_{z=0} = 0 \quad (27)$$

$$\left( \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} \right)_{z=0} = -\frac{1}{\rho_m} \left( \frac{\partial p_m}{\partial z} \right)_{z=0} \quad (28)$$

$$(-\dot{p}_m)_{z=-h_m} = (-\dot{p}_0)_{z=-h_m} \quad (29)$$

$$-\frac{1}{\rho_m} \left( \frac{\partial p_m}{\partial z} \right)_{z=-h_m} = -\frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial p_0}{\partial z} \right)_{z=-h_m} \quad (30)$$

평판 내부의 가진력을 다음 식과 같이 가정한다.

$$f(x, t) = F_0 \delta(x - x_0) \exp(i\omega_0 t) \quad (31)$$

여기서,  $\delta(x - x_0)$ 는 델타함수이다. 식 (31)을 푸리에 변환시키면, 다음 식으로 표현된다.

$$F(k_x, \omega) = F_0(k_x, \omega) \exp(ik_x x_0) \quad (32)$$

$x = x_0$ 에 가진력이 작용하는 경우,  $x$ 축의 동일한

위치에서  $z$ 축 방향으로 떨어진 위치에서의 압력은 다음 식으로 표현된다.

$$p_b(\omega) \equiv [p_b(z, \omega)]_{z=-(h_m+h_0)} = \frac{F_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_b(k_x, \omega) dk_x \quad (33)$$

여기서,  $H_b(k_x, \omega)$ 은 전달함수로서 다음과 같이 표현된다.

$$H_b(k_x, \omega) = A_0(k_x, \omega) \exp[-\alpha_0(h_m+h_0)] \quad (34)$$

$A_0(k_x, \omega)$ 는 경계조건과 파동방정식의 식을 이용하여 구할 수 있다.

한편, 평판의 외부에 기포층이 없이 해수에 의해 직접 접수하는 경우에는 식 (24)~식 (27)의 경계조건은 동일하고 추가적으로 다음의 식을 만족하면 된다.

$$\left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}\right)_{z=0} = -\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial p_0}{\partial z}\right)_{z=0} \quad (35)$$

동일한 방법으로 평판에 해수가 접수한 경우에 위치  $x=x_0$ 에 가진력이 작용하는 경우,  $x$ 축의 동일한 위치에서  $z$ 축 방향으로 떨어진 위치에서의 압력과 전달함수는 다음 식으로 표현된다.

$$p_n(\omega) \equiv [p_n(z, \omega)]_{z=-h_0} = \frac{F_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_n(k_x, \omega) dk_x \quad (36)$$

$$H_n(k_x, \omega) = A_1(k_x, \omega) \exp(-\alpha_0 h_0) \quad (37)$$

그러므로, 기포층이 있는 경우와 없는 경우를 고려하여 기포층에 의한 방사소음의 감소량은 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$NR = 20 \log_{10} \left| \frac{p_b(\omega)}{p_n(\omega)} \right| \quad (38)$$

$$NR = 20 \log_{10} \left| \frac{\int_{-\infty}^{\infty} H_b(k_x, \omega) dk_x}{\int_{-\infty}^{\infty} H_n(k_x, \omega) dk_x} \right| \quad (39)$$

따라서, 각 주파수에 대한 기포층에 의한 방사소음 감소량은 식 (34), 식 (37) 및 식 (39)를 이용하여 기포층이 있는 경우와 없는 경우의 전달함수를

파수에 따라 적분하여 구한다.

#### 4. 수치계산 결과

##### 4.1 기포유체에서 음속의 변화

기포층의 특성은 기포의 크기, 수량 및 두께 등에 의해 많은 영향을 받게 된다. 기포의 크기는 기포의 공진주파수를 좌우하게 되고, 기포의 수량은 해수의 단위체적에 대한 기포의 체적성분비로 표현할 수 있는 것으로 기포유체의 분산성에 많은 영향을 미친다.

평판 주위의 기포층은 압축공기를 이용하여 인위적으로 형성시킬 수가 있다. 주로 직경이 단일한 기포로 형성이 될 수 있고, 특정한 여러 공진주파수가 분포될 수 있도록 사각형분포와 정규분포 등이 있을 수 있다. 기포층에서 기포의 분포특성에 따라 분산성이 어떻게 변화되는지 확인하기 위하여 기포의 체적비는 0.02로 동일하게 유지하면서 Table 1에 나타낸 분포특성을 가지도록 하였다. 중심주파수 1,000 Hz를 기준으로 협대역 분포는 900 ~ 1,100 Hz, A형 분포는 710 ~ 1,420 Hz, B형 분포는 420 ~ 1,840 Hz 그리고 정규분포는 중심 공진주파수가 1,000 Hz이고 표준편차가 200 Hz의 값을 가지도록 하였다. Fig. 3은 이러한 분포의 단위체적당 기포의 수량을 나타내고 있다.

기포의 분포에 따른 음속의 변화는 식 (9)를 이용하여 수치 계산할 수 있으며, 그 결과는 Fig. 4에 나타내었다. 이로부터 기포의 크기 분포가 넓은 기포유체 보다 좁은 기포유체에서 음속구조가 더 급격하게 변화한다. 그러나 기포크기에 따른 공진주파수 대역 이외의 영역에서는 기포분포에 따른 차이가 크지 않음을 알 수 있다.

음파전달에 있어서 손실특성을 가장 잘 나타내는 파수의 허수부에 대한 수치해석 결과는 Fig. 5에 나타내었는데 기포 분포 특성에 따른 음속의 구조가 주파수가 낮은 영역에서는 뚜렷한 차이를 보이고, 기포의 공진주파수 영역보다 더 큰 주파수 영역으로 확장됨을 확인할 수 있다.

기포의 체적비와 공진주파수에 따라 기포유체의 분산성이 어떻게 변화되는지 확인하기 위하여, 기포의 공진주파수가 1,000 Hz를 기준으로 협대역으로 분포하고 체적비를 0.008 ~ 0.060 범위에서 변화시키면서 음속을 계산한 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

이로부터 체적비가 증가할수록 공진주파수 아래 영역에서는 음속변화가 더 증가하고, 공진주파수 보다 큰 영역에서는 음속변화가 적게 일어나다가 그 이상의 주파수 영역에서는 체적비에 상관없이 본래 해수의 음파속도에 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

한편, 동일한 체적비 0.02를 유지하고 공진주파수만을 달리 한 경우에는 Fig. 7에 보인 바와 같이 분산성 특성은 거의 그대로 유지하면서 주파수 특성만 평행 이동하는 것을 알 수 있다. 또한 기포의 분포

특성에 상관없이 공진주파수 이후에 음속이 급격히 상승하여 초음속 상태가 되는 경향은 Fox 등의 실험결과와 유사하다<sup>(5)</sup>.

#### 4.2 기포층에 의한 방사소음 감소

Fig. 1에 표시된 것과 같이 해수와 접한 무한 평판

Table 1 Characteristics of bubbly water

Distribution type	Resonance frequency (Hz)		Diameter of bubbles (μm)
	Center	Bandwidth	
Narrow band	1,000	200	0.0031~0.0038
A Type	1,000	710	0.0024~0.0048
B Type	1,000	1,420	0.0018~0.0080
Normal	1,000	Sigma=200	0.0021~0.0084

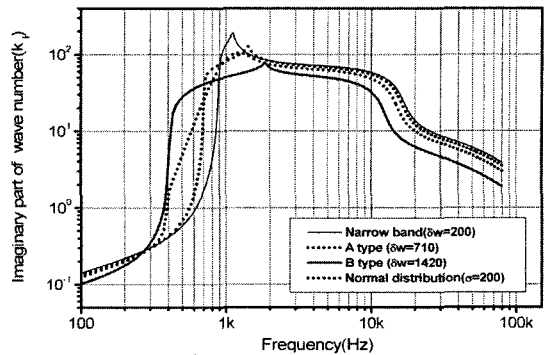


Fig. 5 Imaginary part of wave number of bubbly water for distribution types of air bubble

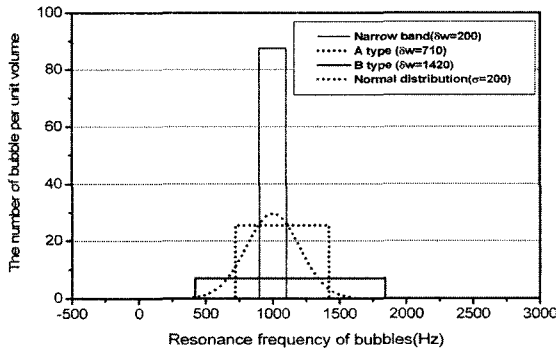


Fig. 3 The number of bubble per unit volume for distribution types of air bubble

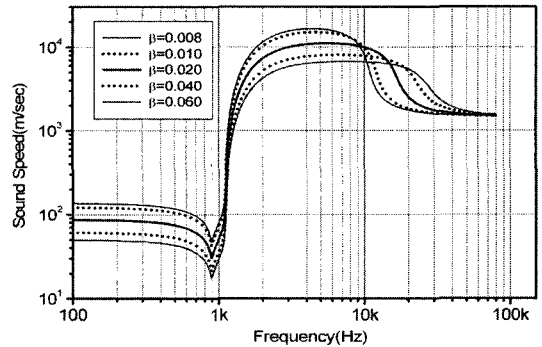


Fig. 6 Sound speed of bubbly water for volume fraction of air bubble

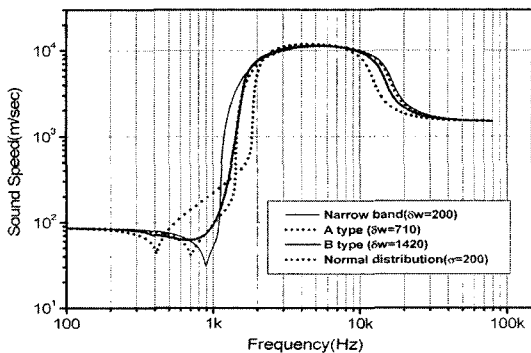


Fig. 4 Sound speed of bubbly water for distribution types of air bubble

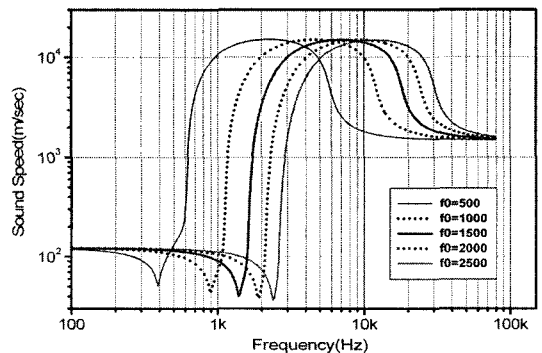


Fig. 7 Sound speed of bubbly water for resonance frequency of air bubble

주위에 기포층을 형성시킨 후, 평판 내부에서의 거리에 따라 수증으로 방사되는 음압의 감소량은 식 (39)를 이용하여 수치 계산할 수 있다. 계산에 사용된 기포의 분포특성은 기포유체의 음속 계산시 사용된 Table 1에 나타난 협대역, A형분포, B형분포 및 정규분포이고, 체적성분비는 0.02, 기포층의 두께 0.0254 m인 경우로 가정하였고, 계산에 사용된 수치해석 파라미터는 Table 2에 나타내었다.

평판 주위에 형성된 기포층의 방사소음 감소량에 대한 수치계산의 타당성은 실험을 통하여 확인하여야 하나, 무한평판 주위에 기포층을 형성하여 이러한 효과를 검증하는 실험이 거의 불가능함에 따라 유체중 기포층에 의한 이론적인 음압의 전달손실량과 비교하였다. 유체중 기포층에 의한 이론적인 음압의 전달 손실량은 일반적으로 잘 알려진 바와 같이 다음 식으로 표현된다<sup>(7)</sup>.

$$TL = 8.68589(k_m)_i h_m \quad (40)$$

여기서,  $(k_m)_i$ 는 파수의 허수부,  $h_m$ 는 기포층의 두께이며,  $TL$ 은 음압의 전달손실량으로 단위는 dB이다.

Fig. 8에서 보는 바와 같이 식 (40)에 의한 결과는 이 연구에서 제시한 모델링 결과와 차이가 날 수 밖에 없으나 무한평판의 유무에 의한 차이므로 상대적인 대략 비교 대상이 될 수 있다. 무한평판 주위에 형성된 기포층의 방사소음 감소효과는 기포 공진주파수 이상의 영역에서 유체중의 기포층에 의한 음압 전달손실량 보다 5~20 dB 정도 큰 것으로 확인되는데, 이는 유체, 기포 및 평판 사이의 경계조건과 무한평판의 거동을 고려하였기 때문인 것으로 판단된다.

기포 분포 특성에 따른 방사소음 감소량에 대한 수치계산 결과는 Fig. 9에 나타내었다. 이로부터 기

포의 크기에 따른 공진주파수가 시작되는 영역에서 소음 감소 효과가 나타나기 시작하며, 약 1 kHz ~ 2 kHz 주파수 대역에서는 기포의 분포 특성에 따라 소음감소 특성도 뚜렷한 차이를 보이고 있는 반면, 중간대역인 약 2 kHz ~ 11 kHz 영역에서는 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이것은 음속의 분산성 특성을 나타내고 있는 Fig. 5에서와 유사한 경향을 나타내는 것이다. 또한, 기포의 분포 특성에 따라 1 kHz ~ 2 kHz 대역과 10 kHz ~ 20 kHz 대역에서 음속구조의 급격한 변화를 보여 주고 있으며, 그 중간 영역에서는 많은 차이가 없음을 확인할 수 있다. 즉, 기포층에 의한 소음 감소 효과는 공진주파수의 저주파수 대역에서는 기포의 분포특성에 의해 많은 영향을 받으면서 두 번째 음속구조가 변화되는 주파수 대역까지 지속되고 있으나, 중간 영역에서는 기포의 분포특성에 의한 영향이 적게 나타난다.

따라서 전반적인 소음 감소효과는 기포의 공진주파수 영역에서 주로 많이 일어나고 있으며, 공진주파수 보다 작은 저주파 대역 보다 고주파수 대역에서 효과가 더 커짐을 알 수 있다. 그러므로 특정주파수 대역에서 기포층에 의한 수증방사소음 감소 효과를 크게 보기 위해서는 협대역 공진주파수 특성을 가지는 기포의 분포 특성이 유리하며, 넓은 주파수 대역에서 적정한 효과를 보기 위해서는 대역폭이 가장 넓은 B형 분포 보다 기포가 적정하게 분포하는 있는 정규분포형 또는 A형 기포분포가 더 효과적임을 알 수 있다.

기포층의 두께가 일정할 때 체적성분비에 따라 음향손실의 변화특성을 확인하기 위하여 정규분포에서 기포층의 두께를 0.0508 m, 체적성분비를 0.008 ~ 0.06범위로 변화시키면서 계산된 소음 감소량은 Fig. 10에 나타내었다. 또한 동일한 정규분포에서 기포층의 두께와 체적성분비를 변화시키면서 계산된 주파수별 감소량과 최대 감소량은 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. 기포층의 두께가 일정할 때, 체적성분비의 증가에 따라 소음 감소량도 증가하나 체적성분비가 높을수록 그 증가폭이 둔화되고 있다. 기포두께에 따른 소음 감소 효과는 일정범위 이상의 기포두께에서는 두께의 증가에 따라 거의 선형적으로 증가하고 있다. 따라서 동일한 기포체적을 이용하여 평판 주위에 방사되는 수증소음을 가장 효율적으로 감소시키기 위해서는 적정한 체적성분비를 유지하고 기포층

Table 2 Values of the physical parameters used for numerical calculation

$c_l = 1500 \text{ m/s}$	$\sigma = 0.0725 \text{ N/m}$
$\rho_l = 1025 \text{ kg/m}^3$	$\gamma = 1.4$
$c_g = 330 \text{ m/s}$	$P_\infty = 101.0 \text{ kPa}$
$\rho_g = 1.21 \text{ kg/m}^3$	$c_d = 5890 \text{ m/s}$
$h_s = 0.006 \text{ m}$	$c_s = 3100 \text{ m/s}$
$\rho_s = 7800 \text{ kg/m}^3$	$\nu = 0.3$
$E = 19.5 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$	$h_0 = 0.0254 \text{ m}$

의 두께를 증가시키는 것이 유리함을 알 수 있다.

Fig. 13은 기포 체적성분비와 기포층의 두께를 고려한 유효 기포량에 대해 기포체적당 소음 감소량을 표

시한 것이다. 기포층의 두께가 0.0254 mm, 0.0508 mm, 0.0762 mm 등 3종류에 대한 계산결과를 모두 표시한 것임에도 불구하고 기포체적당 소음감소 효과는

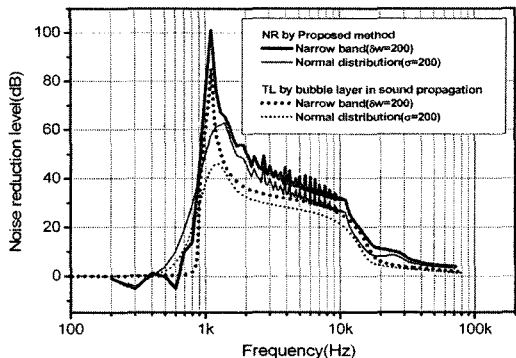


Fig. 8 Comparison between noise reduction by proposed method and theoretical transmission loss for bubble layer,  $\beta=0.02$  and  $h_m=0.0508$  m

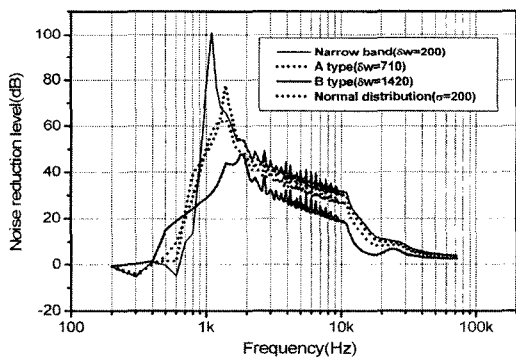


Fig. 9 Noise reduction for statistical types of bubble layer,  $\beta=0.02$  and  $h_m=0.0508$  m

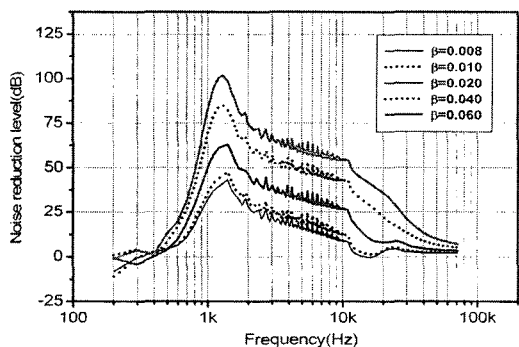


Fig. 10 Noise reduction for normal distribution bubble layers,  $\beta=0.008\sim0.06$  and  $h_m=0.0508$  m

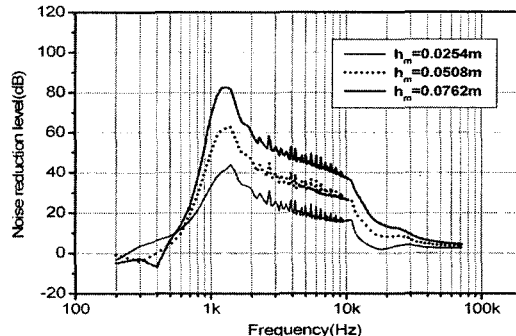


Fig. 11 Noise reduction for normal distribution bubble layers,  $\beta=0.02$  and  $h_m=0.0254\sim0.0762$  m

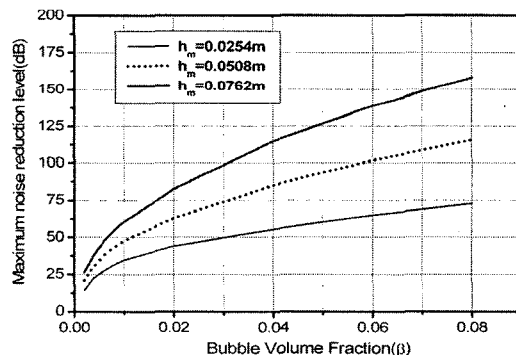


Fig. 12 Maximum noise reduction for normal distribution bubble layers,  $\beta=0.02$  and  $h_m=0.0254\sim0.0762$  m

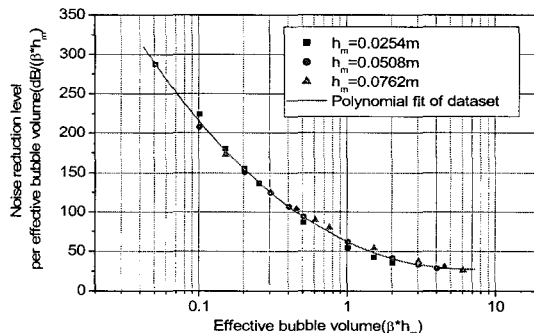


Fig. 13 Maximum noise reduction per effective bubble volume ( $\beta h_m$ ) for normal distribution bubble layers,  $\beta=0.02$  and  $h_m=0.0254\sim0.0762$  m



동일한 경향을 보이고 있다. 즉, 유효 기포량이 적을 수록 더 효과적인 소음감소 효과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

### 5. 결 론

이 연구에서는 기포의 분포특성에 따른 기포유체의 음속 변화를 확인하였으며, 무한평판 주위에 형성된 기포층을 하나의 균질한 매질로 가정하고 compliant baffle로 단순화하여 무한 탄성평판에서 수중으로 방사되는 소음의 감소 효과를 모델링하였다. 이를 위하여 탄성 평판의 파동식을 이용하여 평판의 변위와 응력을 구하고 평판에 접하고 있는 기포유체와 해수에서의 파동방정식을 이용하여 압력을 구한 후, 평판, 기포층 및 해수 등 각 매질 사이의 경계조건을 이용하여 기포층이 있는 경우와 없는 경우의 평판 내부 가진에 따른 방사소음 감소량을 정식화하였다.

기포 유체의 음속 변화와 소음감소 효과에 대한 수치계산 결과, 기포유체의 분산성은 저주파수 대역의 경우 기포분포 특성에 따라 많은 차이가 있고, 기포의 공진주파수 대역보다 큰 고주파수 영역으로 분산성이 확산되는 경향을 가지고 있다. 이에 따라 평판주위에 형성된 기포에 의한 수중방사소음의 감소 효과도 상당한 수준임을 확인하였으며, 기포유체의 분산성 경향과 유사한 감소 특성을 보여주었다.

기포층 특성에 의한 수중방사소음의 감소 효과를 알아보기 위하여 기포층의 두께, 기포의 수량 및 분포특성 등 다양한 조건에 따라 수치계산을 수행한 결과, 적절한 기포 체적을 유지하면서 기포층의 두께를 증가시키는 것이 가장 효과적으로 소음을 감소시킬 수 있는 것으로 판단되며, 기포의 유효체적에 대한 소음 감소효과는 두께에 상관없이 특정한 경향을 가지고 있음을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

(1) Clay, C. S. and Medwin, H., 1977, "In Acoustical Oceanography: Principle and Applications", John Wiley & Sons, pp. 178~215.  
 (2) Kelley, C. T., 1981, "Experimental Study of Noise Reduced by an Underwater Acoustic Bubble

Screen", Naval Postgraduate School.

(3) Wursig, B., Greene, C. R. and Jefferson, T. A., 2000, "Development of an Air Bubble Curtain to Reduce Underwater Noise of Percussive Piling", Marine Environmental Research 49, pp. 79~93.

(4) Leighton, T. G., 1994, "The Acoustic Bubble", Academic Press.

(5) Fox, F. E., et al, 1955, "Phase Velocity and Absorption Measurements in Water Containing Air Bubbles", J. Acoustical. Soc. America, Vol. 27, pp. 534~539.

(6) Wood, A. B., 1930, "A Textbook of Sound", MacMillan, p. 361.

(7) Commander, K. W., Prosperetti, A., 1989, "Linear Pressure Waves in Bubbly Liquids: Comparison between Theory and Experiments", J. Acoustical. Soc. America, Vol. 85, pp. 732~746.

(8) Wilson, P. S., 2005, "Low-frequency Dispersion in Bubbly Liquids", Acoustics Research Letters Online, Vol.6, pp. 188~194.

(9) Ruggles, A. E., 1987, "The Propagation of Pressure Perturbation in Bubbly Air/Water Flows", Ph.D. Dissertation, Rensselaer Polytechnic Institute.

(10) Junger, M. C. and Cole, J. E., 1980, "Bubble Swarm Acoustics: Insertion Loss of a Layer on a Plate", J. Acoustical. Soc. America, Vol. 68, pp. 241~247.

(11) David Feit, 1966, "Pressure Radiated by a Point-excited Elastic Plate", J. Acoustical. Soc. America, Vol. 40, pp. 1489~1494.

(12) Ko, S.-H., et al., 2001, "Structure-borne and Flow Noise Reductions", SNU Press.

(13) Graff, K. F., 1975, "Wave Motion in Elastic Solids", Clarendon.

(14) Achenbach, J. D., 1973, "Wave Propagation in Elastic Solids", North-Holland Publications.

(15) Kim, J. C., Oh, J. S. and Cho, D. S., 2006. "Investigation on Shapes and Acoustic Characteristics of Air Bubbles Generated by an Underwater Nozzle", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 2, pp. 190~197.