

## 수중 기포기둥에 의한 음파의 후방 산란특성 분석

Analysis of Acoustic Back Scattering  
from Bubble Columns in Water

박 광 준\* 윤 석 왕,\* R. A. Roy\*\*

(K. J. Park, S. W. Yoon, R. A. Roy)

## 요 약

수중에서 원기둥 형태의 기포집단에 의한 후방 산란특성을 이론 및 실험적으로 연구하였다. 이론적 해석을 위하여, 기포기둥을 외형과 공기 함유비 및 크기에 의해 특정지워지는 하나의 단일 산란체로 가정하였으며, 일반 산란 이론식을 이용하여 분석하였다. 기포기둥의 공기 함유비가 1% 이하로 작은 경우와 기포기둥을 구성하는 단일기포의 공명 진동수보다 높은 입사 주파수에 대한 기포기둥의 산란특성은 단일기포의 크기보다 공기 함유비에 크게 의존함을 확인하였다. 또한, 공기 함유비가 증가할수록 후방 산란음압은 증가하며, 최대 음압 주파수는 저주파수 영역으로 이동되는 현상이 이론 및 실험적으로 관찰되었다.

## ABSTRACT

Acoustic backscattering from a bubble column in water was studied theoretically and experimentally. For theoretical analysis a general scattering theory was used by assuming the bubble column to be lumped element scatterer which can be characterized by its shape, void fraction and dimensions. When the void fraction is less than 1% and the incident frequency is higher than individual bubble resonance frequencies, the experimental results show that the acoustic backscattering from a bubble column depends mainly on the void fraction rather than the individual bubble sizes. It was also theoretically and experimentally observed that the acoustic backscattering levels were increased and their peaks moved to the lower frequency region by raising the void fraction of bubble column.

## I. 서 론

해양에서의 기포집단은 여러가지 원인에 의해서 발생되지만, 대부분 표층에 넓게 분포하며, 해상조건의 변화에 따라 기포층의 깊이와 밀도, 개개 기포

크기의 분포 등이 달라진다. 이들은 수중에서 소음원으로서 존재할 뿐만 아니라, 표면에서 반사층을 형성하기 때문에 음파전달에 영향을 끼친다<sup>1)</sup>.

최근에 기포집단에 의한 음파산란 현상으로 구형 기포집단의 산란 단면적에 관한 이론적 연구<sup>2,3,4)</sup>가 수행되었으나, 실험적으로 이들을 입증할 수 있는 자료들은 부족한 실정이다.

본 연구에서는 기하학적으로 축 대칭을 이루는

\*성균관대학교 음향학연구소

\*\*U. S. National Center for Physical Acoustics

발생 방법이 비교적 용이한 원기둥 형태의 기포집단, 즉, 기포기둥을 수중에 형성시킨 후, 기포기둥의 원통 반경과 내부 상태의 변화에 따른 산란 특성을 측정하였으며, 기포 기둥의 산란 형태를 결정짓는 물리적 변수를 추적하였다. 또한 기포집단을 단일 물질을 갖는 산란체로 가정하고, 유체 매질내에 물리적 특성이 다른 유체로 된 산란체의 산란특성을 기술할 수 있는 이론<sup>1)</sup>을 적용하여 원기둥 형태 기포 집단의 산란특성을 해석하였다.

## II. 산란 음압 이론

간단한 외형을 갖는 수중 구조물의 산란 특성에 대한 이론적 해석은 근 30년간 지속적으로 연구되고 있다<sup>2)</sup>. 기포집단의 외형을 원기둥 형태로 가정하고, 산란체의 입사압력은

$$p_i = P_0 \sum \epsilon_n i^n \cos(n\theta) J_n(kr) \quad (1)$$

인 평면파가 입사하는 경우, 그림 1의 원통좌표에 대하여, 산란음장은

$$p_{sc} = P_0 \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos(n\theta) H_n^{(1)}(kr) \quad (2)$$

와 같이 일반적인 형태의 산란 음압 수식으로 표현할 수 있다. 여기서  $P_0$ 는 압력진폭,  $\epsilon_n$ 는 Neumann factor,  $k$ 는 파수이며,  $J_n(kr)$ 과  $H_n^{(1)}(kr)$ 은 각각 위수  $n$ 의 Bessel함수와 제1종 Hankel 함수이다. 미지의 산란 진폭계수  $A_n$ 은 산란체 특성에 의해 결정되므로, 산란체의 경계면 조건에 따라 각기 다른 형태로 표현된다.

기포집단에 대한 산란 진폭계수  $A_n$ 을 결정하기 위해서는, 먼저 압력이 파동방정식 (3)식과 기포기둥의 경계면에서 압력 상계조건 (4)식을 만족해야 하며, 입자속도의 동경방향 성분 역시 경계면에서의 연속조건 (5)식을 만족해야 한다.

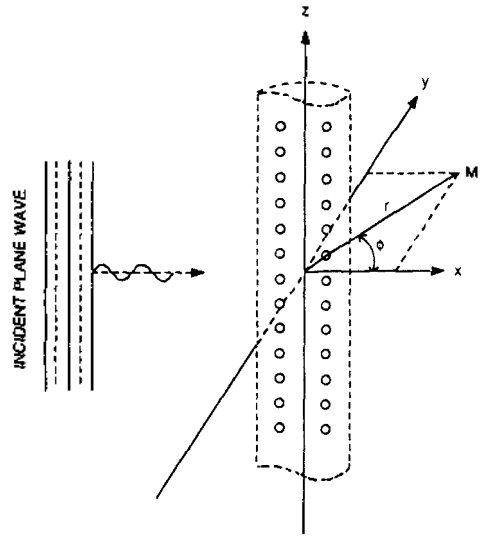


그림 1. 원기둥 형태의 기포집단에 의한 산란특성을 기술하기 위한 원통좌표계

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (3)$$

$$P_i^{(a)} + P_{sc}^{(a)} = P_e^{(a)}, \quad (4)$$

$$u_{rh}(a) + u_{rsc}(a) = u_{re}(a), \quad (5)$$

여기서, 첨자  $i$ 와  $sc$ 는 입사, 산란파에 관한 물리량을  $e$ 는 기포 내부에서의 물리량을 의미하며, 시간 조화 함수로 주어지는 압력과 입자 속도의 동경방향 성분은 다음 관계식으로 주어진다.

$$u_r = \frac{-i}{\rho c} \frac{\partial p}{\partial (kr)} \quad (6)$$

입사 및 산란음압에 대한 (1), (2)식을 (6)식의 산란을 이용하여 (3), (4), (5)식에 대입하면, 기포집단에 대한 산란 진폭계수  $A_n$ 은

$$A_n = -\epsilon_n i^n / (1 + B_n) \quad (7)$$

여기서,  $B_n$ 은

$$B_n = \frac{J_n'(k_0 a) N_n(k_0 a) - J_n(k_0 a) J_n'(k_0 a)}{[J_n'(k_0 a) \cdot J_n(k_0 a)] / [J_n(k_0 a) \cdot J_n'(k_0 a)] - (\rho_g / \rho_w) \cdot (c_g / c_w)} \quad (8)$$

로 주어진다. 여기서  $N_n(ka)$ 은 위수  $n$ 의 Neumann 함수, 부호 '은 Bessel 함수의 변수에 대한 1차 도함수를 의미하며, 첨자  $g$ 와  $w$ 는 기포집단과 물에 대한 상수를 의미한다. 실제로 산란 진폭계수  $A_n$ 의 값을 산출하기 위해서는, 기포집단의 물리적 특성을 나타내는 기포집단의 모양, 크기, 밀도와 기포집단 내부에서의 음파 전달속도가 정확하게 대입되어야 한다. 기포집단의 외형, 내부의 단일기포 반경과 갯수는 실측치로 주어지며, 이들을 근거로 산출된 기포집단의 밀도와 기포집단 내부에서의 음속은

$$\rho_g = (1-\beta) \rho_w + \beta \cdot \rho_a \quad (9)$$

$$c_g = \frac{c_w}{\sqrt{1 + \frac{4\pi c_w^2 N b}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\delta\omega}}} \quad (10)$$

로 주어진다<sup>6)</sup>. 여기서  $\beta$ 는 기포집단의 체적에 대한 함유된 공기체적의 비율로 정의되는 공기함유비(void fraction)이며  $b$ 는 단일기포반경,  $\omega_0$ 는 단일기포의 공명 각진동수,  $\omega$ 는 입사음의 각주파수,  $N$ 은 단위 체적당 기포의 갯수,  $\delta$ 는 기포집단 내부에서 음파의 감쇠 상수이다. 감쇠 상수  $\delta$ 는

$$\delta = \frac{2\eta}{\rho_a a^2} + \frac{P_e}{2\rho_a \omega a^2} \operatorname{Im}\Phi + \frac{\omega^2 a}{2c}$$

이며, 이는 차례로 점성도, 열전도, 재방사에 의한 감쇠효과가 모두 포함된 것임을 알 수 있다. 여기서

$$\Phi = \frac{3\gamma}{1 - 3(\gamma - 1)\alpha \left[ (i/\chi)^{1/2} \coth(i/\chi)^{1/2} - 1 \right]}$$

$$P_e = P_a + \frac{2T}{a}$$

$$\chi = \frac{D}{\omega a^2}$$

로 주어지며,  $P_a$ 는 주변압력,  $P_e$ 는 내부압력,  $T$ 는 표면장력,  $D$ 는 기체 인화상수,  $\gamma$ 는 비열비,  $\eta$ 는 주변 매질의 점성도이다.

(10)식에서 보는 바와 같이 기포집단 내부에서의 음속은 점성도, 열전도도, 재방사에 의한 감쇠효과를 포함하고 있으며, 공기 함유비는 단위체적당 기포의 갯수와 반경으로 표현되어 있다. (9)식에서 공기함유비  $\beta$ 가 낮은 값을 갖는 경우,  $\beta$ 의 기여도는 기대할 수 없으므로, 기포집단의 밀도는 주변 매질인 물의 밀도와 거의 같게 된다. 음속변화는 (10)식의 분모항에 표시된 바와 같이, 입사 주파수가 단일기포의 공명 주파수 영역을 벗어난 고주파수인  $\omega \gg \omega_0$ 인 경우에는 분모의 2차항은 무시가능하며, 기포집단 내에서의 음속  $c_g$ 는 물에서의 음속  $c_w$ 과 같은 값으로 주어진다.

### III. 실험방법

수중에 형성된 원기둥 형태의 기포집단에 의한 후방 산란음압을 측정하기 위해서, 동일 지점에 음원과 수신기용 별도로 배치시킨 bistatic method를 택하였다. 실험은 원기둥 음장조건을 만족할 수 있도록 2.1m×2.1m×1.8m의 수조 내에 그림 2와 같이 대각선 방향으로 음파 진행경로를 택하였다.

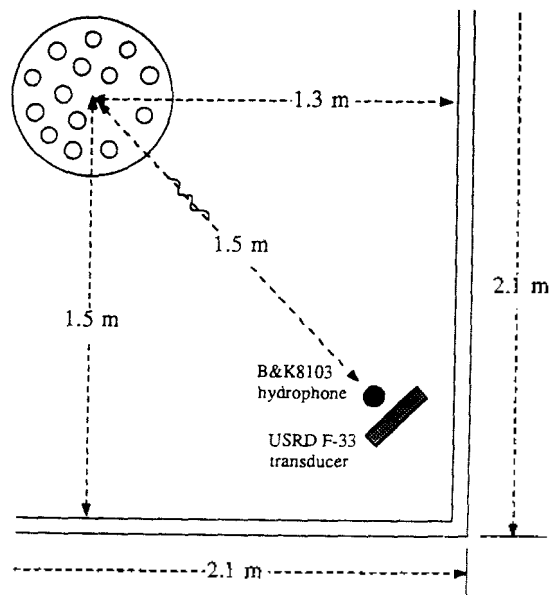


그림 2. 후방 산란음압을 측정하기 위한 산란체의 수조내 기포의 배열

수중 음파의 발생은 정확한 발생기를 이용하여 250ms의 일정한 펄스폭을 갖는 11kHz~50kHz의 정현파 신호를 발생시킨다. 수중 내에서 진함에 의한 간섭효과를 피하기 위하여 실험방법 수직선 1호로 하였으며, 전각중조기를 통해 증폭된 신호가 수관체에 놓인 한 음압으로 입지될 수 있도록 수중변환기 (NKL : USRD F33)의 능동전압을 조절하였다. 그림 3은 실험장치의 배치도로서 기호발생 장치와 증폭의 송수신 장치를 보여준다.

수중에 기포집단을 형성시키기 위해서, 압축 공기 탱크로부터 고주 튜브를 통하여 유출되는 공기량은 고정밀 유량계를 사용하여 조절하였으며, 끝이 평면으로 잘린 분출구를 통하여 수중에서 공기관 분사된

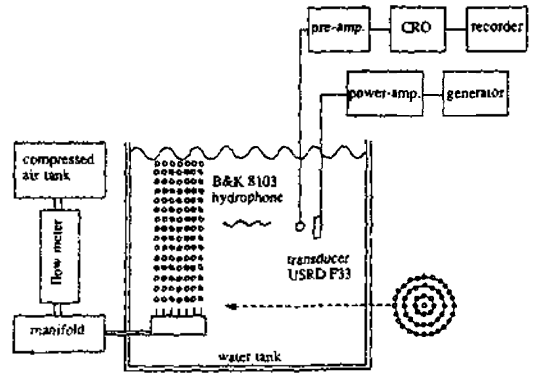


그림 3. 실험 장치도

으로서 일정 크기의 공기 방울이 일정한 방향으로

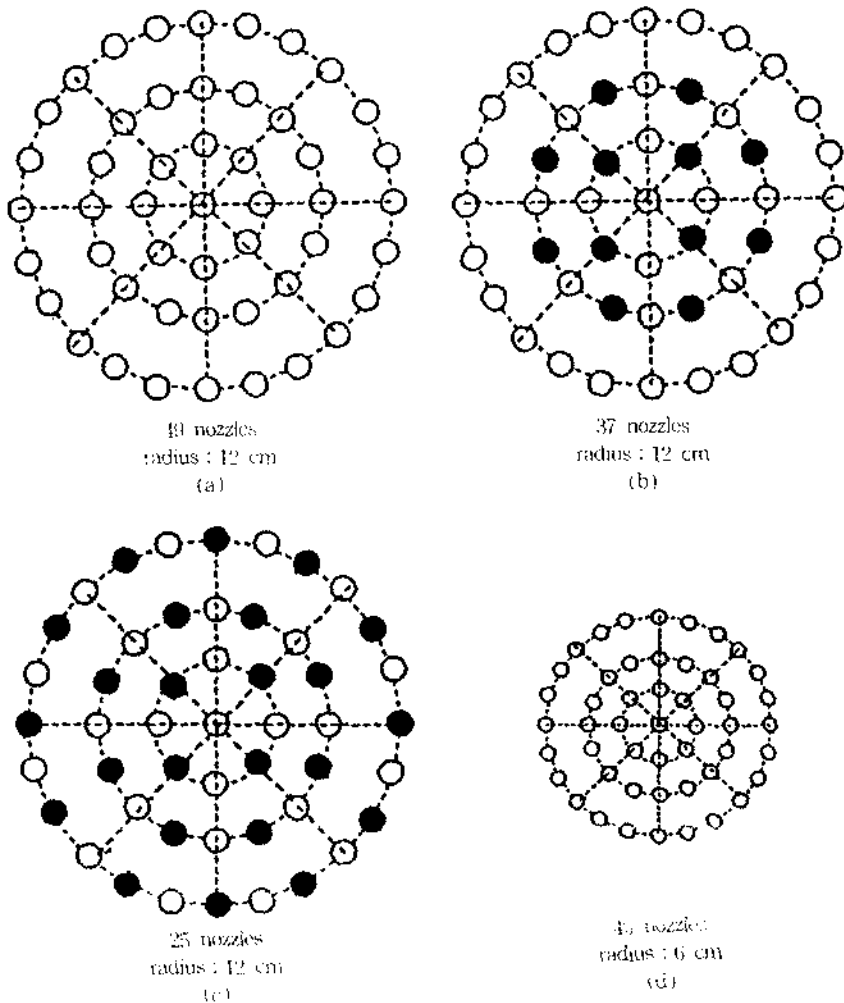


그림 4. 분출구 개폐된 방향의 변화  
(○ : opened nozzle, ● : closed nozzle)

연속적으로 형성되도록 하였다. 또한, 유량계를 통하여 나온 공기는 다중 분리관(manifold)을 거치면서 기포발생관에 배열된 각 분출구에 일정량의 공기로 공급하며, 각 분리관에 설치된 밸브를 이용하여 기포를 만들 수 있는 분출구의 개수를 조절할 수 있도록 하였다. 혼합 매질의 부피에 대한 함유된 공기의 부피 비율로 정의되는 기포집단의 공기 함유비는 다음의 세가지 방법으로 변화시켰다. 첫째, 유량계를 조절하여 일정한 외형의 원통 내부에 들어찬 공기량을 변화시키는 방법, 둘째, 다중 분리관에 부착된 밸브를 여닫음으로써 분출구의 분포를 그림 4(a), (b), (c)와 같이 조절하여 일정한 외형의 원통 내부에 들어찬 동일 크기의 공기방울 개수를 변화시키는 방법과, 셋째, 기포 발생관의 분출구 분포반경을 그림 4(a), (d)와 같이 변화시키는 방법들을 택하였다.

산란체로부터 입사파의 진행방향과 반대방향으로 되돌아오는 후방산란음파는 수중청음기(B&K 8103)로 수신한 후, 전치 증폭기(B&K 2635)를 통하여 증폭시켜 디지털 오실로스코프(LeCroy 9400A)로 판독하였다.

IV. 실험 결과 및 분석

분출구 분포 반경이 12 cm인 기포 발생관에 의해 만들어지는 기포집단에 대하여, 단위 시간당 분출되는 공기량이 각 분출구당 1.5ml/s가 되도록 유량계를 조절하면서 분출구의 개수를 그림 4(a), (b), (c)와 같이 변화시켰다. 분출구 49개를 모두 열은 상태(그림 4.a), 맨 바깥 분출구는 모두 열고 안쪽 분출구 12개를 일정 간격으로 닫은 상태(그림 4.b), 전체 분출구에 대하여 분출구 24개를 일정 간격으로 닫은 상태(그림 4.c)에서 만들어진 기포기둥의 후방 산란특성은 그림 5와 같다. 세가지 경우에 대하여 기포기둥의 외형은 15 cm로 동일하며, 각 분출구의 유출 공기량을 일정하므로 기포기둥을 구성하는 단일 기포의 크기 역시 동일하다. 그러나, 분출구의 개수가 감소함에 따라 기포기둥 내부에 존재하는 기포의 개수가 줄어들게 되며, 이로 인하여 각 경우의 공기 함유비는 0.23 %, 0.17 %, 0.12 %로 산출되

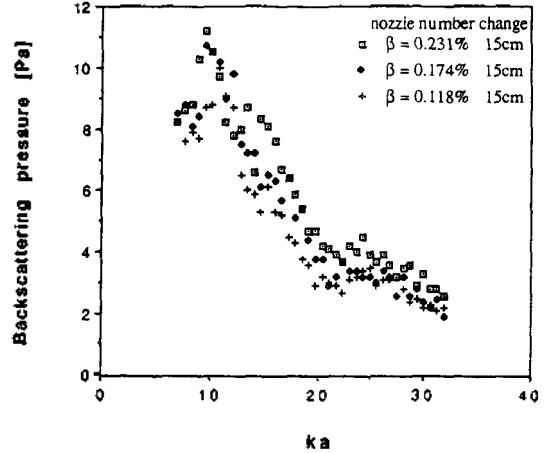


그림 5. 기포 발생관의 분출구 개수 변화에 의한 ka에 대한 후방 산란 유압.

었다.

그림 5는 측정 결과를 파수와 산란체 반경의 상관 관계로 주어지는 ka에 대한 산란압력으로 표현하였으며, ka값은 산란체의 원통반경 a가 일정하므로 입사 주파수 변화를 의미한다.

49개의 각 분출구로부터 단위 시간당 분출되는 공기량을 각 분출구당 1.5 ml/s, 1.0 ml/s, 0.5 ml/s의 세가지로 변화시켰을 때의 각 경우에 대한 산란특성은 그림 6과 같다.

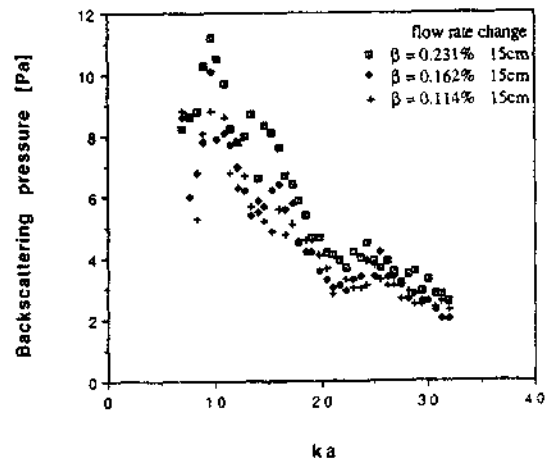


그림 6. 각 분출구로부터 분출되는 공기량 변화에 의한 ka에 대한 후방 산란 유압.

그림 6의 경우에 분출량의 변화에 따라 단일 기포의 크기는 각각 직경 0.24 cm, 0.20 cm, 0.16 cm로

측정되었으며, 각 경우에 대한 공기 함유비는 0.23%, 0.16%, 0.11%였다.

공기함유비가 아주 작은 기포기동으로 부터 되돌아오는 후방산란신호는 움직이는 산란체와 입사음파의 순간적인 상호작용의 상태에 따라 달라지므로 매우 불안정하다. 따라서 본 실험자료는 입사음파의 안정상태 영역이 기포집단의 구성 기포들과 충분히 상호작용을 일으킨 후에 방사되는 신호만을 선별하여 통계처리하였다.

그림 5는 기포기동을 구성하는 단일기포의 반경이 같은 경우이며, 그림 6에서는 기포반경이 세가지로 다르지만 유사한 산란특성으로 나타나고 있다. 단일기포의 관점에서 볼 때에 그림 6에서 산란음압이 최대가 되는  $ka$ 의 위치가 기포반경에 의존하여 바뀌어야 하나, 산란 음압의 최대 위치가 구별되지 않고 있다. 이로써 공기 함유비가 작거나 입사 주파수가 단일기포나 기포집단의 고차 공명영역인 경우에는 산란특성에 대하여, 단일 기포 특성의 기여도는 미약하며, 기포집단에 의한 특성이 지배적임을 알 수 있다.

공기함유비의 변화폭을 크게 하기 위하여, 기포발생기의 외반경이 6cm인 기포발생관을 이용하였으며, 혼합매질의 체적을 감소시킴으로써 공기함유비의 변화폭을 이용하였으며, 혼합매질의 체적을 감소시킴으로써 공기함유비의 변화폭을 크게하였다. 그림 7은 단위시간당 분출되는 공기량을 각 분출구당

1.5 ml/s, 0.5 ml/s로 조절하여 만든 기포기동에 대한 후방산란특성의 측정결과이다.

이 경우, 기포기동을 구성하는 기포 반경은 그림 6의 경우와 같이 0.24 cm, 0.16 cm이지만, 기포 기동의 반경은 8cm로 줄어들면서 공기 함유비의 변화폭이 커짐에 따라 주파수 변이 현상이 나타남을 알 수 있었다. 그러나, 본 실험에서 변화 가능한 공기 함유비의 범위는 0.1%~1.0%였으며, 입사주파수 또한 기포집단의 공명진동수와 단일 기포의 공명진동수보다 훨씬 큰 11kHz~50kHz 영역이다. 즉, 공기함유비가 극미한 경우에 해당되므로, (9)식의 결과로부터 기포집단의 밀도와 물의 밀도는 거의 같은 값을 갖게 된다. 또한 일반적인 기포집단 내에서의 음속에 관한 관계식 (10)에 대하여, 입사주파수가 단일 기포의 공명진동수보다 훨씬 큰  $\omega \gg \omega_0$ 의 경우이므로, 공기함유비의 변화에 거의 영향을 받지 않아 기포집단 내에서의 음속과 물 속에서의 10 m/s 이내의 차이를 보인다.

결국, 기포집단의 밀도와 음속을 나타내는 (9)식과 (10)식의 결과를 산란 이론식에 적용시켰을 때, 실험적으로 얻어진 산란 형태의 차이를 해석할 수 없게 된다. 즉, 임피던스 차이가 없는 매질을 산란체로서 인식하지 않는다는 사실과 실험결과는 일치하지 않는다. 그러므로, 주변매질과 미소한 특성 차이를 갖는 산란체의 산란 해석을 위한 기포집단 내부에서의 음속에 대한 보다 정확한 자료가 요구되어진다.

본 연구에서는 일반 산란 이론을 이용하여 실험적으로 나타난 산란 주파수 특성의 해석을 시도하였다.

기포집단은 내부 상태와 입사 주파수가 변함에 따라, 기포집단의 압축도 (compressibility)에 의존하여 음파 전달 속도가 변화된다는 사실<sup>10)</sup>에 근거하여, 산란체 내부의 음속을 임의의 50 m/s 간격으로 1200 m/s로부터 1450 m/s까지 연속적으로 지정하여 사라운안을 계산하였으며, 그 결과를 그림 8에 나타내었다.

기포집단 내부에서의 음파전달 속도가 감소함에 따라 산란 특성 곡선의 이론적 곡선을 실험영역에 해당하는  $ka$  구간에 이 점에 점을 나타내 보이기 시작했으며, 현예질의 위치가  $ka$  값이 낮은 쪽으로 이동한

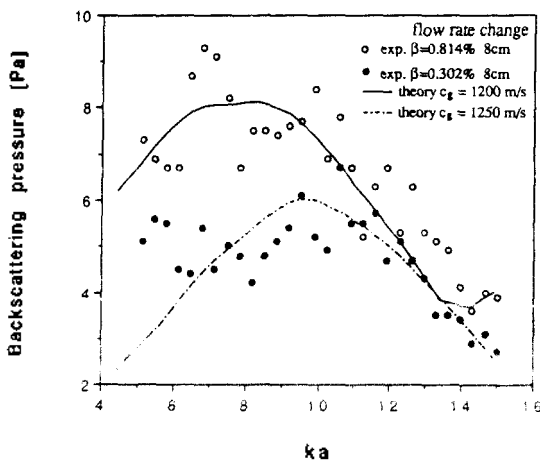


그림 7. 6cm 기포 발생관에 대하여 분출 공기량 변화에 의한  $ka$ 에 대한 후방 산란 음압의 이론치와 실험치

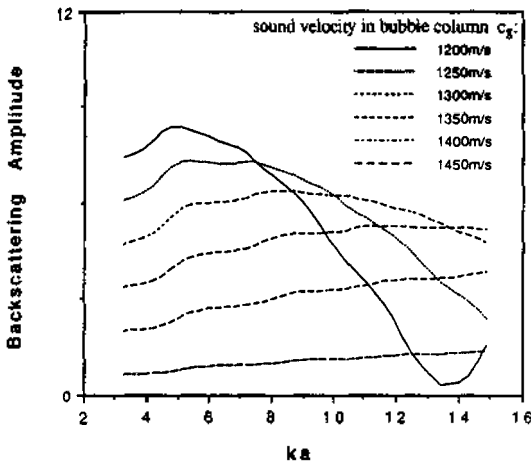


그림 8. 원기둥 형태의 기포집단 내부의 음속 변화에 의한  $ka$ 에 대한 산란음압.

을 알 수 있었다. 그림 7의 실험 결과와 비교해 보면, 실험적으로 공기함유비의 증가에 따라 침예점의 위치가  $ka$ 값이 낮은 쪽으로 이동하는 경향을 설명할 수 있게 된다. 이는 공기함유비가 높아질수록 공명주파수가 낮아지는 현상<sup>(6)</sup>에 대응하는 것으로서, 기포 공명 주파수의 고차 배진동에 해당하는 주파수로 감소되는 경향으로 해석할 수 있게 된다.

## V. 결 론

기포집단의 산란 특성 결과를 해석하기 위하여 단일 산란체에 의한 산란음압 이론적으로 부터 계산된 결과와 측정치를 비교한 결과, 기포기둥의 산란특성은 공기 함유비에 따라 변화되는 여러 가지 특성중에 기포기둥 내부의 음파전달 속도의 변화에 의해 주되게 결정됨을 확인하였다. 이로써 수많은 단기포로 이루어진 기포기둥을 단일 산란체로 가정하여 해석할 수 있었으며, 기포기둥의 산란특성을 결정짓는 일차적인 인자는 공기 함유비임을 밝혔다.

결국 공기 함유비가 증가할수록 기포기둥의 후방 산란 특성은 주파수에 대한 산란음압차가 두드러지게 나타나며, 최대음압 주파수가 낮은 쪽으로 이동한다. 또한, 기포기둥의 공기 함유비 변화의 원인이 되는 구성 단기포의 갯수는 산란음압의 크기에 영향을 주며, 구성 단기포의 반경 변화에 의한 영향은

고차 공명 영역에서는 실험적으로 구분되지 않음을 확인하였다.

## 감사의 글

본 논문의 저자들은 U.S. Office of Naval Research의 지원에 의해 이 연구가 가능하였음에 감사한다.

## 參考文獻

1. C.S. Clay and H. Medwin, *Acoustical Oceanography*, (John Wiley & Sons, New York, 1977), chap 6, pp. 194~203.
2. R. Omta, "Oscillations of a cloud of bubbles of small and not so small amplitude", *J. Acoust. Soc. Am.*, **82**, 1018~1033(1987).
3. L.d' Agostino and C.E. Brennen, "Acoustical absorption and scattering cross sections of bubble clouds", *J. Acoust. Soc. Am.* **84**, 2126~2136(1988).
4. J.D. Alemar, P.P. Delsanto, E. Rosario, A. Nagl and Uberall, "Spectral Analysis of the Scattering of Acoustic Waves from a Fluid Cylinder, II : Denser fluid inside", *Acustica*, **61**, 7~13(1986).
5. L. Flax, G.C. Gaunard and H. Uberall, "Theory of Resonance Scattering", in *Physical Acoustics IV*, edited by W.P. Mason and R.N. Thurston (Academic Press, New York, 1981), chap 3, pp. 191~291.
6. K.W. Commander and A. Prosperetti, "Linear Pressure waves in bubbly liquids: Comparison between theory and experiments", *J. Acoust. Soc. Am.* **85**, 732~746(1989).
7. E. Silbermann, "Sound Velocity and Attenuation in Bubbly Mixtures Measured in Standing Wave Tubes", *J. Acoust. Soc. Am.* **29**, 925~933(1957).
8. 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**, 300~306(1991).
9. S.W. Yoon, K.J. Park, L.A. Crum, M. Nicholas, R.A. Roy, A. Prosperetti and N.Q. Lu, "Collective Oscillations in a Bubble Column", in *Natural Physical Science of Underwater Sound*, edited by B.R. Kerman (Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 1991) in press.

▲박 광 준

- 1979년 : 성균관대학교 물리학  
과(이학사)
- 1982년 : 성균관대학교 물리학  
과(이학 석사)
- 1991년 : 성균관대학교 물리학  
과(이학 박사)

▲R.A. Roy

- 1981년 : University of Maine  
(B.S.)
- 1983년 : University of Miss-  
issippi (M.S)
- 1985년 : Yale University(M.  
Phil)
- 1987년 : Yale University(Ph.  
D.)
- 1987년~1988년 : Apfel Enterprises, New Haven,  
CT, U.S.A. 이사
- 1988년~현재 : U.S. National Center for Physical  
Acoustics, 책임 연구원 및 University of  
Mississippi 조교수  
Acoustical Society of America (Member)

▲윤 석 왕



- 1983년 : The University of  
Texas at Austin(  
Ph.D)
- 1978년~1980년 : 국방과학  
연구소 연구원
- 1981년~1983년 : The Univ-  
ersity of Texas at  
Austin, Applied  
Research Laboratories,  
연구원
- 1984년~1987년 : U.S. Naval Postgraduate School,  
Dept. of Physics, 초빙교수 및 U.S. Nati-  
onal Center for Physical Acoustics, 책임  
연구원
- 1985년~현재 : U.S. National Center for Physical  
Acoustics, 연구 자문위원 IEEE (Senior  
Member), Acoustical Society of America  
(Member)