

다중 주파수를 이용한 캐비테이션 기포의 분포량 추정

Estimation of Cavitation Bubble Distribution Using Multi-Frequency Acoustic Signals

김 대 옥*, 나 형 술*, 최 지 웅*, 나 정 열*, 강 돈 혁**
(Daek Kim*, Hyongsul La*, Jee Woong Choi*, Jungyul Na*, Donhyug Kang**)

*한양대학교 해양환경과학과 해양음향연구실, **한국해양연구원
(접수일자: 2009년 2월 2일; 수정일자: 2009년 3월 20일; 채택일자: 2009년 3월 25일)

캐비테이션 기포 (cavitation bubble)가 존재하는 유체 내에서 다중 주파수 (multi-frequency)를 송수신할 때 음파의 감쇠 (attenuation)와 음속 (sound speed) 변화가 발생되었고, 이 특징을 이용하여 기포의 크기와 분포량을 추정하였다. 음향 실험은 20 ~ 300 kHz 대역의 다중 주파수를 이용하여 실시하였고, 기포가 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우의 주파수별 음속 비와 음파의 감쇠 값을 측정하였다. 캐비테이션 기포는 모터 끝에 장착된 등근 막대형 블레이드 (blade)를 물 속에서 고속 회전시켜 발생되었다. 캐비테이션 기포의 크기 및 분포량은 모터의 회전 속도, 블레이드 끝단 (tip)의 길이를 변화시키며 관측하였고, 기포 생성 후 시간별 기포량 감소율을 측정하였다. 실험 결과 발생한 기포의 크기는 반경 10 ~ 60 μm 였고, 10 ~ 20 μm 와 20 ~ 30 μm 반경의 기포가 전체의 약 45%와 25%를 차지하였다. 세부실험 결과로 모터의 회전 속도가 증가할수록 더 많은 양의 기포가 발생되지만 블레이드 끝단 면적의 증가와 기포 발생량의 변화는 상관성이 없음을 확인하였다. 또한 기포량의 감소율은 지속시간별로 일정하였고, 2분 이내에 전체량의 80%가 소멸됨을 관측하였다. 음향실험의 결과를 검증하기 위해 동일한 조건에서 광학카메라로 촬영한 기포 분포량과 비교하였다.

핵심용어: 캐비테이션, 기포 분포, 기포 크기, 공진주파수, 분산

투고분야: 수중음향 분야 (5)

Distribution of cavitation bubbles relative to change of the sound speed and attenuation in the water was estimated using acoustic signal from 20 to 300 kHz in two cases that cavitation bubbles exist and do not exist. To study generation and extinction property of cavitation bubble, bubble distribution was estimated in three cases: change of rotation speed (3000~4000 rpm), surface area of blade (32~98 mm^2) and elapsed time (30~120 sec). As a result, the radii of the generated bubbles ranged from 10 to 60 μm , and bubble radius of 10~20 μm and 20~30 μm was accounted for 45 and 25 % of the total number of cavitation bubbles, respectively. And generation bubble population correlated closely with the rotating speed of the blades but did not correlate with the surface area of blade. It was observed that 80% of total bubble population disappeared within 2 minutes. Finally, acoustic data of bubble distribution was compared with optical data.

Keywords: Cavitation, Bubble distribution, Bubble size, Resonant frequency, Dispersion

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5)

I. 서론

캐비테이션은 유체의 속도가 증가할 때 그 내부 압력이 포화증기압 보다 낮은 압력 조건이 되어 액체가 기화 (vaporization)되는 현상을 말한다. 이와 유사한 끓음 (boiling) 현상은 일정한 압력에서 온도가 증가할 때 기포가

발생되지만, 캐비테이션은 일정한 온도에서 압력이 낮아질 때 기포가 발생하는 특징이 있다. 일반적으로 캐비테이션은 선박의 프로펠러나 펌프의 내부에서 자주 발생된다 [1,2].

캐비테이션 기포는 공기로 형성된 기포와 압력, 밀도, 음속 등과 같은 물리적 특성의 차이가 있다. 캐비테이션 기포는 주변 압력에 의해서 기포가 깨어질 때 매우 큰 압력 (848 bar)과 온도 (15000 K)와 빛의 형태로 에너지가 방출된다. 캐비테이션 기포가 주변 금속에 부착하여

책임저자: 나 정 열 (najy0252@hanyang.ac.kr)
경기도 안산시 상록구 사3동 1271번지 한양대학교 해양환경과학과 해양음향연구실 (전화: 031-400-4156; 팩스: 031-406-6458)

깨어질 때 음속을 마보시킬 정도의 파괴력을 갖는데 이를 이용하여 정밀 부품의 세척, 체내 담석제거, 미세유해 물질의 제거 등 여러 분야에 유용하게 사용되고 있다 [4].

캐비테이션 기포가 오페수의 정확, 미세 유해 물질의 제거 등에 사용될 때, 그 효율성과 효과를 측정하기 위해서는 발생 조건에 따른 생성된 기포의 크기와 분포량을 측정할 필요가 있으며, 생성된 기포가 시간별로 어떤 비율로 존재와 소멸하는지를 음향을 이용하여 연구할 필요가 있다.

기존에 음향을 이용한 공기 기포의 크기와 분포량 측정은 다양한 방법으로 많은 연구가 실시되었다 [10-14]. 하지만 공기 기포와 물리적 특성이 다른 캐비테이션 기포에 대한 음향학적 연구는 아직 미비한 실정이다.

그러므로 본 논문에서는 모터 회전에 의해 발생하는 캐비테이션 기포의 크기와 분포량을 음속과 감쇠값의 변화를 이용하여 추정하였다. 또한 장착된 블레이드의 회전 속도와 면적을 변화시키면서 발생하는 캐비테이션 기포의 크기와 분포량을 관측하였고 지속시간에 따른 캐비테이션 기포의 분포량 변화를 살펴보았다. 또한 캐비테이션 기포 크기를 광학현미경으로 촬영하여 음향실험 결과와 비교하였다.

II. 이론

수중에 기포가 존재할 때 기포의 크기와 분포량은 분산 (dispersion)에 의한 유체의 주파수별 음속 변화와 감쇠값 변화를 이용하여 추정하게 된다.

기포가 존재하는 유체의 음속은 $\rho_A \neq \rho_0$ 라는 가정 하에서 다음식과 같이 밀도와 압축률로 나타낼 수 있다. 여기서 ρ_A 는 기포를 포함한 유체 전체의 밀도이고, ρ_0 는 기포가 없는 유체의 밀도이다 [3-6].

$$c_A = \left(\frac{1}{\rho_A K_A} \right)^{1/2} = \left(\frac{1}{\rho_A (K_0 + K_b)} \right)^{1/2} = \frac{c_0}{(1 + A - iB)^{1/2}} \quad (1)$$

여기서 c_A 는 기포가 존재하는 경우 유체의 음속, c_0 는 기포가 없는 경우 유체의 음속, K_A 는 기포가 존재하는 경우 유체의 압축률, K_0 는 기포가 없는 경우 유체의 압축률, K_b 는 기포의 압축률을 나타낸다.

위 식 (1)의 밀도와 압축률을 이용하여 계산한 A 와 B 는 다음과 같다.

$$A = \frac{(Y^2 - 1)}{(Y^2 - 1)^2 + \delta^2} \frac{4\pi a N c_0^3}{\omega^2} \quad (2-1)$$

$$B = \frac{\delta}{(Y^2 - 1)^2 + \delta^2} \frac{4\pi a N c_0^3}{\omega^2} \quad (2-2)$$

여기서 $Y (= \omega_B / \omega)$ 는 공진주파수와 주파수의 비, a 는 기포의 반경, N 은 단위면적당 ($1m^3$) 기포량, δ 는 감쇠 상수이다.

전파 상수 (propagation constant)는 ω 와 c_A 의 관계로 식 (1)을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_A = \frac{\omega}{c_A} = \frac{\omega(1 + A - iB)^{1/2}}{c_0} \quad (3)$$

식 (3)을 테일러 전개 (Taylor expansion)의 일차식을 이용하여 나타내면 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$k_A = k_0 \left(1 + \frac{A}{2} - i \frac{B}{2} \right) \quad (4)$$

이 복소수 k_A 의 실수부는 분산에 의한 음속 (ω/k_{re})에서의 전파 상수이고, 허수부는 음파의 감쇠를 나타낸다. 이 실수부와 허수부는 크라머스-크로니히 관계 (Kramers-Kronig relation)를 이용하여 주파수에 대한 함수로 정리되며 기포가 존재하는 유체의 음속을 나타낸다.

$$c = \frac{\omega}{k_{re}} = c_0 \left\{ 1 - \left[\frac{(Y^2 - 1)}{(Y^2 - 1)^2 + \delta^2} \right] \left[\frac{2\pi a N c_0^3}{\omega^2} \right] \right\} \quad (5)$$

식 (5)를 이용하여 수중에 반경 $15 \mu m$ 의 기포가 $1 m^3$ 당 3.5×10^7 개 존재할 때, $20 \sim 300 kHz$ 주파수 대역에서의 음속은 그림 1과 같은 값을 갖는다.

수중에 기포가 존재하는 경우의 음속 (c)과 존재하지 않는 경우의 음속 (c_0 : $1454 m/s$)은 공진 주파수보다 낮은 주파수에서는 $c < c_0$ 이고, 높은 주파수에서는 $c > c_0$ 의 특징을 갖는다. 그리고 c 값의 변화가 공진주파수 부근의 주파수에서 가장 크게 나타나며, 공진주파수에서 c 와 c_0 는 거의 같은 값을 갖는다. 또한 공진 주파수와 멀리 떨어진 주파수 대역에서는 c 와 c_0 의 비가 1에 가까운 값으로 수렴한다.

식 (4)의 허수부를 이용하여 주파수에 대한 감쇠값을 나타내면 식 (6)과 같다 [7].

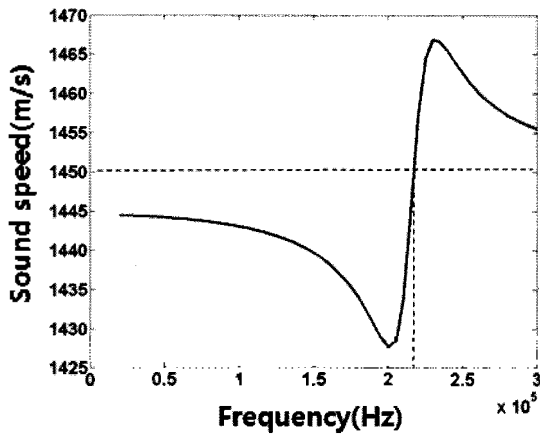


그림 1. 단일 크기 기포가 존재하는 유체에서의 주파수별 음속 변화 (기포 반경: 15 μm , 공진 주파수: 217 kHz)
 Fig. 1. Variation of sound speed with frequency by single-size bubbles in the water (bubble radius: 15 μm , resonant frequency: 217 kHz).

$$\beta(\omega) = \frac{\omega}{c_0} \left(\frac{B}{2} \right) = \frac{2\pi\omega}{\omega} \left[\frac{aN\delta}{(Y^2 - 1)^2 + \delta^2} \right] \quad (6)$$

감쇠값은 공진 주파수 대역에서 가장 크게 나타나고, 공진 주파수로부터 멀어질 수록 그 값이 0으로 수렴한다. 식 (6)을 이용하여 수중에 반경 15 μm 의 기포가 1 m^3 당 3.5×10^7 개 존재할 때, 20 ~ 300 kHz 주파수 대역에서의 감쇠값을 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

위 식 (5)와 (6)을 이용하여 기포가 존재하는 유체의 음속과 감쇠를 구할 수 있는데 이를 반대로 생각하여 실험을 통해 측정된 음속과 감쇠값을 통하여 기포의 크기와 분포량을 역산 할 수 있다. 또한 수중 기포에 의한 음속과 감쇠값 변화의 특징을 이용하여 단일 크기의 기포뿐만 아니라 여러 가지 크기의 기포들이 존재할 때에도 그 기포의 크기별 분포량을 추정 할 수 있다 [8,10]. 이를 간단히 3가지 크기의 기포들이 존재하는 경우로 가정하여 그 음속과 감쇠값을 계산하면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 이때 각 크기별 기포량은 1 m^3 당 3.5×10^7 개로 가정하였다.

물속에 존재하는 기포에 의해서 분산 (dispersion)이 일어날 때 기포의 크기에 따라서 주파수별 위상속도 (phase velocity)가 달라지게 된다. 다음 식 (7)은 여러 가지 크기의 기포가 존재하는 매질의 음속 (C_m)과 순수한 매질의 음속 (c_l)비를 표현하였다 [8].

$$\frac{c_l^2}{C_m^2} = 1 + 4\pi c_l^2 \int_{a_{lo}}^{a_{hi}} \frac{aN(a)}{w_0^2 - w^2 + 2ibw} da \quad (7)$$

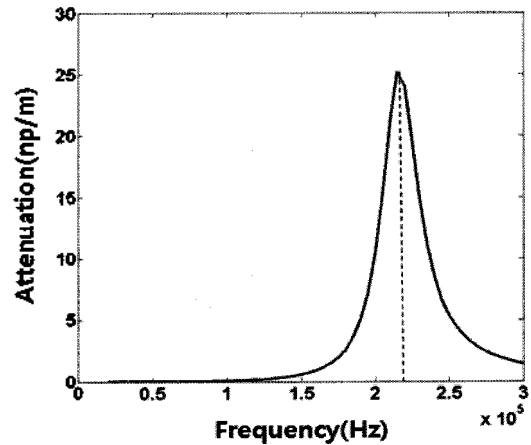


그림 2. 단일 크기 기포가 존재하는 유체에서의 주파수별 감쇠 변화 (기포 반경: 15 μm , 공진 주파수: 217 kHz)
 Fig. 2. Variation of attenuation with frequency by single-size bubbles in the water (bubble radius: 15 μm , resonant frequency: 217 kHz).

w 는 각주파수, w_0 는 공진주파수, $N(a)$ 는 기포 크기에 따른 기포량 그리고 b 는 감쇠 상수 (damping constant)이다.

$$\frac{c_l}{C_m} = u - iv \quad (8)$$

식 (7)의 제곱근을 실수와 복소수로 나누어 식 (8)과 같이 표현 할 수 있고, 여기서 실수부는 음속, 허수부는 감쇠를 나타낸다. 식 (7)와 식 (8)을 이용하여 기포 크기에 따른 기포량 ($N(a)$)의 관계를 나타내는 다음 두 식을 얻을 수 있다.

$$4\pi c_l^2 \int_{a_{lo}}^{a_{hi}} \left[\frac{(w_0^2 - w^2)a}{(w_0^2 - w^2)^2 + 4b^2w^2} \right] N(a) da = \int_{a_{lo}}^{a_{hi}} k_1(a, w) N(a) da = u^2 - v^2 - 1 \quad (9-1)$$

$$4\pi c_l^2 \int_{a_{lo}}^{a_{hi}} \left[\frac{bwa}{(w_0^2 - w^2)^2 + 4b^2w^2} \right] N(a) da = \int_{a_{lo}}^{a_{hi}} k_2(a, w) N(a) da = iv \quad (9-2)$$

식 (9)에서 기포 크기와 주파수로 구성된 두 적분 함수를 k_1 과 k_2 로 나타낼 수 있다 (그림 4).

실험을 통해 기포가 존재하지 않는 물에서의 음속 (c_l)

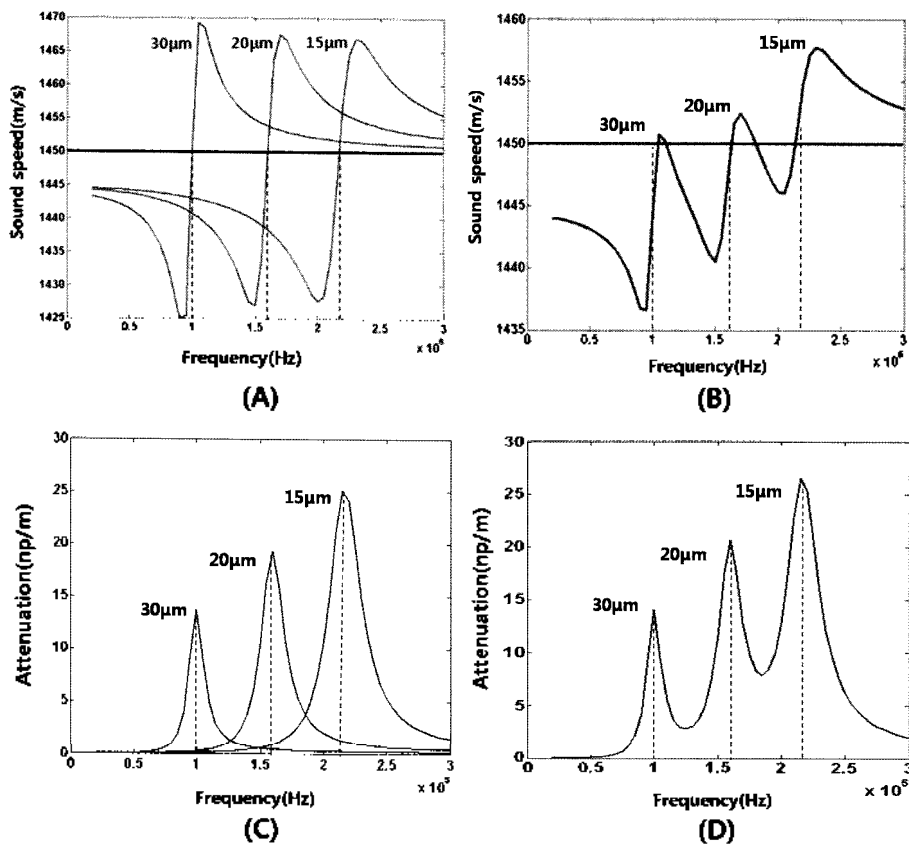


그림 3. 여러 가지 크기의 기포가 존재하는 유체에서의 주파수별 음속 감쇠 변화 (기포 반경: 15, 20, 30 μm , 공진 주파수: 217, 160, 100 kHz) (A): 단일 기포에 의한 음속 변화, (B): 3가지 크기의 기포에 의한 음속 변화, (C): 단일 기포에 의한 감쇠값, (D): 3가지 크기의 기포에 의한 감쇠값

Fig. 3. Variation of sound speed and attenuation with frequency in bubbly water (bubble radius: 15, 20, 30 μm , resonant frequency: 217, 160, 100 kHz) (A): Variation of sound speed with single-size bubbles, (B): Variation of sound speed with multi-size bubbles, (C): Variation of attenuation with single-size bubbles, (D): Variation of attenuation with multi-size bubbles.

을 측정하고 기포가 존재하는 물에서의 음속 (c_m)을 측정하여 u 값을 구할 수 있고, 기포가 존재하지 않는 물을 통해 수신된 음압과 기포가 존재하는 물의 음압의 비를 이용하여 v 값을 구할 수 있다 (식 (10), 식 (11)).

$$u(f) = \frac{c_l \Delta t}{d_{ER}} = \frac{c_l}{c_m} \tag{10}$$

$$v(f) = -\frac{c_l \log[P^2(f)/P_{ref}^2(f)]}{4\pi f d_{ER}} \tag{11}$$

Δt 는 음파의 도달 시간, d_{ER} 은 송수신기간의 거리, f 는 입사 주파수, P 와 P_{ref} 는 기포가 존재할 때 수신된 음압과 기포가 존재하지 않는 물에서의 음압이다. 수신된 신호로부터 계산된 u 와 v 값은 식 (19)의 k 적분 함수와 기포 크기별 분포량 ($N(a)$)으로 나타낼 수 있다. 각 기포 크기에 해당하는 공진 주파수에서의 k 적분 함수와

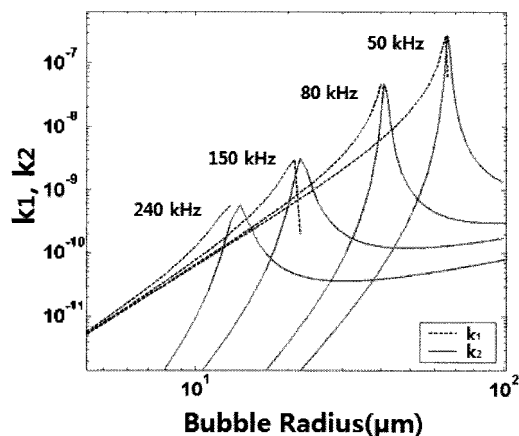


그림 4. 기포의 반경과 주파수와 관계된 Kernel 함수 (k_1, k_2)
Fig. 4. Kernel functions (k_1, k_2) related to bubble radius and frequency.

u 와 v 값을 이용하여 기포의 크기별 분포량을 역산할 수 있다 [8].

III. 실험 및 방법

실험에 사용된 30 (가로) × 30 (세로) × 55 (높이) cm의 유리수조 안에 30 ℓ의 담수 (fresh water)를 넣고, 수심 25 cm에 ABS (Acoustic Bubble Spectrometer) 송신기와 수신기를 위치시켰다. ABS 장치는 수중에 기포가 존재하지 않는 경우와 존재하는 경우의 음속과 감쇠값의 변화를 이용하여 기포의 크기별 분포량을 측정하는 장치이다. 이 장치는 10 μm 간격으로 기포크기를 측정한다. 장치 설치 시 송신기와 수신기의 거리는 직접신호와 벽으로부터 반사되는 신호의 분리를 위해 9.8 cm로 설정하였다. 실험 시 수온은 12.5 °C, 음속은 1454 m/s였다. 먼저 기포가 존재하지 않는 유체에서의 음향데이터 획득을 위하여 실험 전에 담수를 미리 유리수조에 넣고 약 3시간동안 방치하였다. 대기 시간 동안 ABS장치를 이용하여 기포에 의한 음향적 특성의 추이를 파악하여 유체 내에 기포가 존재하지 않는 것을 확인하였다. 그 후 기포가 존재하지 않는 유체 내에서 20 ~ 300 kHz 주파수를 10 kHz 간격으로 송수신하여 음향 신호를 획득하였다. 다음으로 기포가 존재하는 유체에서의 음향 특성을 파악하기 위해 고속 모터 끝에 장착된 둥근 박대형 블레이드를 회전시켜 캐비테이션 기포를 발생 시킨 후 20 ~ 300 kHz 주파수 대역의 신호를 송수신하였다.

신호 송수신을 위하여 각 주파수당 5 cycle의 신호를 송신 증폭기 (NF HSA4101)를 통해 34 dB 증폭시켜 송신기에서 음파를 발생시켰다. 캐비테이션 기포가 존재하는 유체를 통해 전달된 수신 신호는 필터 (dual channel programmable filter, NF3628) 를 거치면서 1 kHz 고주파 대역 통과 필터로 저주파수 대역의 잡음이 제거되고 12 dB가 증폭 되었다. 그리고 A/D 컨버터 (DF ABS converter)를 통해 컴퓨터에 저장되었다 (그림 5).

세부 실험으로 회전 속도에 따른 캐비테이션 기포의 발생 특성을 보기 위해 3000, 3500, 4000 rpm의 속도로 40 초간 기포를 생성 시킨 후 신호를 송수신하였다. 사용된 블레이드의 회전 반경은 51 mm 이고, rpm과 회전 반경을 이용해 단위 시간당 거리로 계산하면 회전 속도는 각각 16 m/s, 18.7 m/s, 21.4 m/s이었다.

블레이드 끝단 길넓이의 증가에 따른 캐비테이션 기포의 크기와 분포량 측정 실험에서는 3500 rpm의 속도와 40초의 동일한 기포 발생 시간의 조건에서 면적이 다른 4 종류의 블레이드를 사용하여 실험을 실시하였다. 블레이드 끝단의 길넓이는 각각 32, 52, 70, 98 mm²이었다.

또한 생성된 캐비테이션 기포의 지속시간 별 분포량

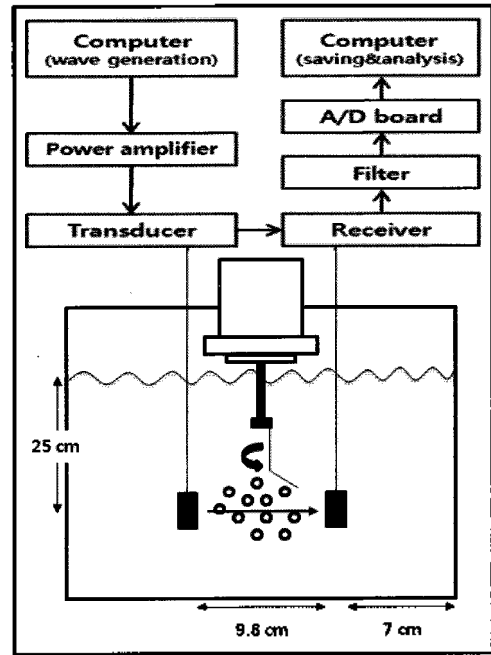


그림 5. 실험 구성도
Fig. 5. Experimental layout for measurement of cavitation bubbles distribution.

변화를 알아보기 위해서 40초 동안 4000 rpm의 속도로 블레이드를 회전시키고, 회전을 멈춘 후 30 초 간격으로 2분 동안 다중 주파수를 송수신하여 시간에 따른 기포량의 감소율을 측정하였다.

음향을 이용한 실험의 검증을 위해 광학카메라를 이용하여 기포의 크기를 측정하였다. 유리 수조에 30 ℓ의 유체를 채우고 고속 모터로 40초 동안 4000 rpm 속도로 캐비테이션 기포를 발생시켰다. 모터를 멈춘 후 수조의 앞쪽에 위치한 광학 카메라와 뒷쪽에 위치한 조명을 이용해 촬영하였다. 카메라의 초점을 수조 안 25 cm 깊이에 1 cm² 이내의 넓이로 맞추게 하여 그 안에 들어온 기포를 연속해서 촬영하였다. 고속 모터의 정지 후 1분 이내에는 유체의 흐름이 지속되기 때문에 정밀한 기포의 촬영이 어렵다. 그러므로 유체의 흐름이 거의 없는 1분 이후부터 약 2분 동안 사진을 촬영하였다. 촬영된 50 여장의 사진으로부터 기포의 크기를 구하기 위해 미리 측정된 기준 크기의 원과 비교하여 절대적 수치로 환산하였다.

IV. 분석 및 결과

캐비테이션 기포가 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우의 신호를 비교하여 그 음속비와 감쇠값을 주파수 별로 비교하였다 (그림 6).

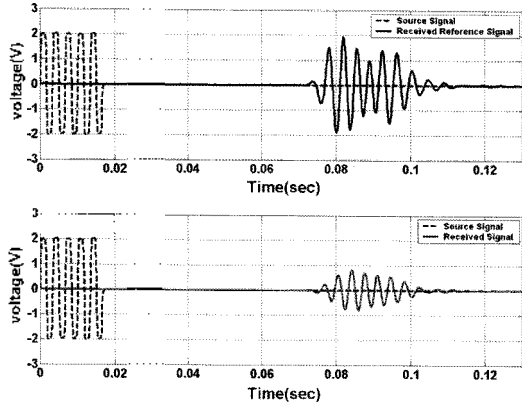


그림 6. 송신신호와 기포의 유무에 따른 수신신호(300 kHz): (A: 캐비테이션 기포가 존재하지 않는 경우 B: 캐비테이션 기포가 존재하는 경우)

Fig. 6. Source and received signals in the water at 300 kHz (A: signals without cavitation bubbles, B: signal with cavitation bubbles).

두 경우의 신호로부터 도달 시간 (travel time)과 진폭 (amplitude)의 차이를 계산하여 u 와 v 값을 구할 수 있다.

그림 7 (A)는 기포가 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우의 음속비 u 를 나타내고 그림 7 (B)는 기포가 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우의 음파의 감쇠값 v 를 나타내고 그림 7 (C)는 3500 rpm의 회전속도에서의 u 와 v 값을 이용해 계산된 기포의 크기별 분포량을 나타낸다.

발생된 캐비테이션 기포의 크기는 반경 10~60 μm 의 범위를 갖고 그 중 반경 10~20 μm 기포가 가장 많은 양을 차지하고 있다. 10~20 μm 의 평균 크기인 반경 15 μm 기포의 공진 주파수 217 kHz 주변에서 u 값이 급격히 변하고 공진 주파수에서는 1에 가까운 값 (~ 1.03)을 갖는다. 또한 v 값 역시 공진 주파수 대역에서 가장 큰 값을 갖는다. 반면 기포가 존재하지 않는 유체에서의 u 와 v 값은 모든 주파수 대역에서 각각 1과 0에 가까운 값을 갖는다.

위의 관계로부터 세부 실험에서 측정된 u 와 v 값을 이용하여 단위 부피당 캐비테이션 기포의 크기별 분포량을 계산하여 표 1에 나타내었다.

고속 회전에 의해서 발생하는 캐비테이션 기포의 크기 분포는 반경 10~60 μm 의 범위를 갖는다. 특히 캐비테이션 기포가 다수 발생하는 3500 rpm 이상의 속도에서는 반경 10 ~ 30 μm 기포의 분포량이 70 % 이상을 차지하였다.

베르누이 식 (Bernoulli's equation)에 의해서 회전 반경이 5.1 mm 일때 2800 rpm ($=14.9 \text{ m/s}$)에서 캐비테이션 기포가 발생되기 시작한다. 그리고 회전속도가 증가

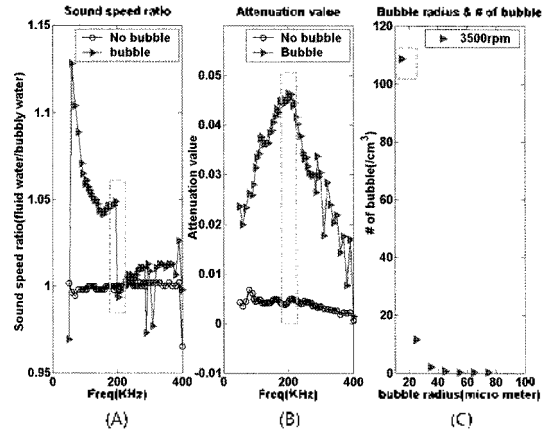


그림 7. 캐비테이션 기포 분포량 추정(A: 음속비(u), B: 감쇠값(v), C: 기포 분포량)

Fig. 7. Calculation of cavitation bubble distribution (A: sound speed ratio (water/bubbly water), B: Attenuation value, C: Bubble distribution).

회전속도	3000rpm	3500	4000
10-20 μm	17 개/ml	98	117
20-30	7	37	57
30-40	3	11	12
40-50	1	4	8

(A)

회전속도	A type	B	C	D
10-20 μm	106 개/ml	97	102	100
20-30	47	37	40	54
30-40	14	11	11	13
40-50	6	4	6	6

(B)

회전속도	30초 후	60	90	120
10-20 μm	121 개/ml	79	36	19
20-30	24	57	27	11
30-40	8	8	3	1
40-50	2	2	1	1

(C)

표 1. 단위면적당 기포의 크기별 분포량 (A: 회전속도, B: 블레이드 겹넓이, C: 지속시간별)

Table 1. Cavitation bubble distribution vs. rotation speed (A), blade surface area (B), duration time (C).

할수록 기포 발생량이 증가한다. 그림 8은 회전속도가 3000, 3500, 4000 rpm으로 증가할 때 1 ml 당 캐비테이션 기포의 수를 나타낸다.

3000과 3500 rpm에서의 기포량 증가율은 3500과 4000 rpm에서 보다 크며, 4000 rpm에서 가장 많은 양의 기포가 발생되었다. 특히 다수를 차지하는 반경 10 ~ 30 μm 기포에서 그 경향이 뚜렷이 나타난다.

블레이드의 겹넓이와 기포 분포량의 결과를 보면 고속 모터를 회전시킬 때 블레이드 끝단의 면적이 32 mm^2 에서 98 mm^2 로 3 배 이상 증가해도 발생하는 기포의

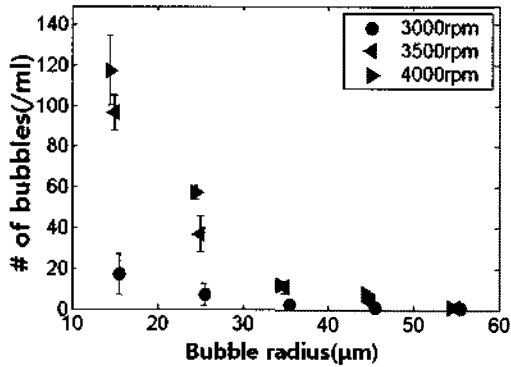


그림 8. 회전 속도별 기포 분포량 (3000, 3500, 4000 rpm)
Fig. 8. Cavitation bubble distribution vs. rotation speed (3000, 3500, 4000 rpm).

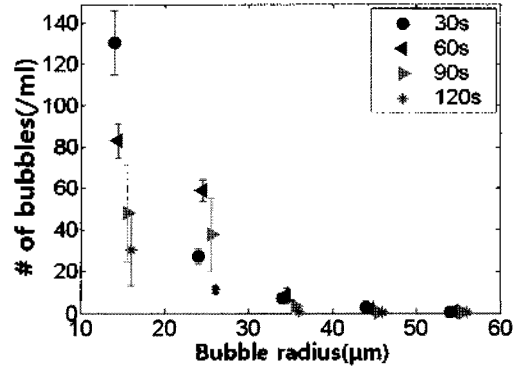


그림 10. 지속시간별 기포 분포량 (30, 60, 90, 120 sec)
Fig. 10. Cavitation bubble distribution vs. duration time(30, 60, 90, 120 sec).

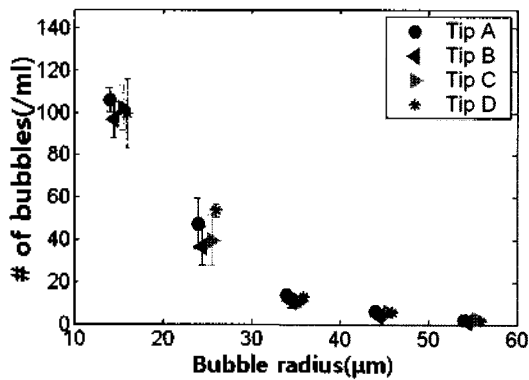


그림 9. 블레이드의 결널면별 기포 분포량 (Type A: 32 mm², Type B: 52 mm², Type C: 70 mm², Type D: 98 mm²)
Fig. 9. Cavitation bubble distribution vs. blade surface area (Type A: 32 mm², Type B: 52 mm², Type C: 70 mm², Type D: 98 mm²).

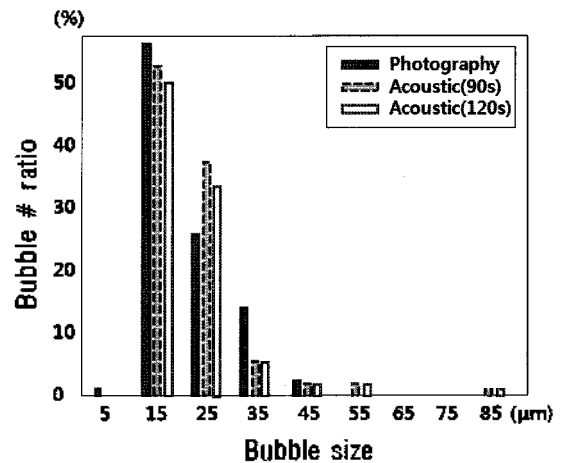


그림 11. 광학카메라 촬영과 음향 측정을 이용한 기포 분포량 비교
Fig. 11. Comparison of optical photography data with acoustic measurement for cavitation bubble distribution.

크기와 양의 차이가 거의 없음을 확인하였다. 즉, 블레이드 끝단의 결널면과 기포 생성량은 상관성이 거의 없다 (그림 9).

캐비테이션 기포의 지속 시간별 소멸률을 살펴보기 위해 캐비테이션 기포를 생성시킨 후 30초 간격으로 2분까지 기포량의 변화를 관측하였다. 일반적으로 캐비테이션 기포는 생성 직후 수초 안에 모두 붕괴되어 사라지게 된다. 하지만 미세 캐비테이션 기포는 더 긴 시간 지속될 수 있는데 이는 표면장력과 관련되어 있다 [15,16]. 또한 음향과 광학적인 관측으로 캐비테이션 기포가 지속되는 것을 확인하였다. 전체 기포 중 다수를 차지하는 반경 10 μm ~ 20 μm 의 기포는 30초 마다 대략 절반의 기포량이 감소되는 것을 관찰하였다. 또한 대부분의 기포가 2분 이내에 전체의 80% 이상이 소멸되는 것을 알 수 있다 (그림 10).

음향 실험 결과의 검증을 위해 광학카메라를 이용한

기포 크기 측정을 실시하였다. 광학 카메라 촬영은 고속 모터의 회전을 멈춘 후에도 유체의 움직임이 있으므로 주로 모터 정지 후 유체의 흐름이 느려진 1분 후부터 3분 후까지 실시되었다. 그러므로 촬영시간과 가장 유사한 90초와 120초의 음향 실험 결과를 이용하여 광학 카메라 촬영 결과와 비교하였다. 기포 크기의 범위는 반경 8 ~ 50 μm 이며, 전체 기포 중 반경 10 ~ 30 μm 의 기포가 80%를 차지하고 있었다 (그림 11).

반경 10 ~ 30 μm 의 기포가 음향 실험과 광학 카메라 촬영 결과 모두에서 가장 우세하게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 기포의 크기별 분포량이 각각 유사한 비율을 차지하고 있었다. 그러나 광학카메라에서는 음향 실험 결과와 달리 반경 5 μm 의 미세한 기포가 소량 관측되고, 반경 50 μm 이상의 기포가 관측 되지 않았다. 그 이유는 실험에 사용된 다중 주파수의 범위가 20 ~ 300 kHz이기 때문에 600 kHz의 공진 주파수를 갖는 반경

5 μm 의 기포를 탐지 할 수 없었기 때문이다.

V. 요약 및 토의

고속회전에 의해서 발생되는 캐비테이션 기포의 크기는 반경 10 ~ 60 μm 의 범위를 갖고 반경 10 ~ 30 μm 의 기포가 전체의 70 % 이상을 차지한다. 캐비테이션 기포 발생의 특징을 음향을 이용하여 살펴보면 회전속도가 증가할수록 기포의 생성량이 증가한다. 그러나 블레이드 끝단의 깊이의 변화에 따른 기포 생성량의 차이는 없었다. 그리고 기포 생성 후 2분 이내에 80 %의 기포가 소멸되었다. 위 음향 실험의 측정치는 광학 카메라 촬영을 통하여 검증되었다.

본 실험에서는 공기 기포에 대한 이론과 연구를 바탕으로 캐비테이션 기포의 크기와 분포량을 측정하였다. 일반적으로 공기포 채워져 있는 기포와 액체가 상변화를 일으켜 발생된 캐비테이션 기포는 표 2와 같이 상당한 차이가 있다.

캐비테이션 기포의 내부 밀도 값이 공기 기포보다 70배가 더 작고 음속은 캐비테이션 기포에서 100 m/s 이상 더 빠르다. 캐비테이션 기포의 내부는 일반적으로 거의 진공이라고 알려진 만큼 그 내부 압력이 매우 낮고 공기 기포와 40배 가까이 차이가 난다 [2].

캐비테이션 기포는 공기 기포와 물리적 특성이 다르기 때문에 본 실험에서 기포의 크기와 분포량 산출을 위해 가장 중요한 인자인 공진주파수의 차이가 생길 수 있다. 기포의 크기에 따른 공진주파수를 나타내는 식은 다음과 같다.

$$f_R = f'_R \sqrt{b\beta} \frac{1}{2\pi a} \sqrt{\frac{3\gamma P_A b\beta}{\rho_A}} \quad (12)$$

식 (12)에서 f_R (공진주파수) 는 f'_R (고유진동수)과 b (표면장력 포함 함수) 그리고 β (열전도도 포함 함수)의

곱으로 나타낼 수 있다. 나머지 인자로 a 는 기포반경, γ 은 비열비, P_A 은 주변 압력, ρ_A 은 밀도를 나타낸다. 일반적으로 f_r 값 대신에 f'_r 값을 공진주파수로 사용하여도 되지만 20 μm 이하의 기포에서는 b 와 β 값을 고려해 주어야 정확한 값을 구할 수 있다 [11].

$$b^{-1} = \left[1 + \left(\frac{d}{b} \right)^2 \right] \left[1 + \frac{3\gamma - 3}{X} \left(\frac{\sinh X - \sin X}{\cosh X - \cos X} \right) \right] \quad (13-1)$$

$$\beta = 1 + \frac{2\tau}{P_A a} \left(1 - \frac{1}{3\gamma b} \right) \quad (13-2)$$

$$\frac{d}{b} = 3(\gamma - 1) \left[\frac{X(\sinh X + \sin X) - 2(\cosh X - \cos X)}{X^2(\cosh X - \cos X) + 3(\gamma - 1)X(\sinh X - \sin X)} \right] \quad (13-3)$$

$$X = a \sqrt{\frac{2w\rho_g C_{pg}}{K_g}} \quad (13-4)$$

여기서 γ 는 비열비, P_A 는 주변압력, τ 는 표면장력, a 는 기포 반경, w 는 각주파수, ρ_g 는 기체의 밀도, C_{pg} 는 기체의 비열, K_g 는 기체의 열전도도이다. 일반 공기기포의 γ 는 1.4, P_A 는 $1.013 \times 10^5 (1 + 0.1z)$ dyns/cm², τ 는 75 dyns/cm, a 와 w 는 임의의 값, ρ_g 는 $\rho_{g,A} [1 + 2\tau / (aP_A)] (1 + 0.1z)$, $\rho_{g,A}$ 는 1.29×10^{-3} g/cm³, C_{pg} 는 0.24 cal/g, K_g 는 5.6×10^{-5} cal/(cm)(s)(°C), μ 는 0.01 g/cm.s, z 는 기포의 깊이의 값을 갖는다. 그리고 공기 기포와 캐비테이션 기포의 물리적 특성 차이는 표 2의 값을 사용하였다. 위의 인자들을 캐비테이션 기포의 물리적 특성값으로 대입하면 캐비테이션 기포의 공진 주파수를 계산할 수 있다. 크기별 캐비테이션 기포와 공기 기포의 공진 주파수를 계산하면 다음 그림과 같은 결과를 얻게 된다 (그림 12) [11].

가장 많은 분포량을 차지하고 있는 반경 15 μm 기포에서 캐비테이션 기포와 공기 기포의 공진 주파수는 각각 212.7 kHz와 218.3 kHz이다. 캐비테이션 기포의 공진 주파수가 공기 기포의 공진 주파수 보다 6.6 kHz가 더 작다. 또한 공진 주파수 200 kHz에 해당하는 캐비테이션

	Temp (°C)	Pressure (kpa)	Density (kg/m ³)	Specific Heat ratio	Viscosity (g/m.s)	Sound speed (m/s)
Cavitation (vapor)	20	2.54	0.017	1.33	0.01817	444.4(50°C)
Air	20	100	1.204	1.4	0.01786	343.2

표 2. 캐비테이션 기포와 공기 기포의 물리적 특성 비교
Table 2. Comparison of cavitation bubble vs. air bubble in physical property.

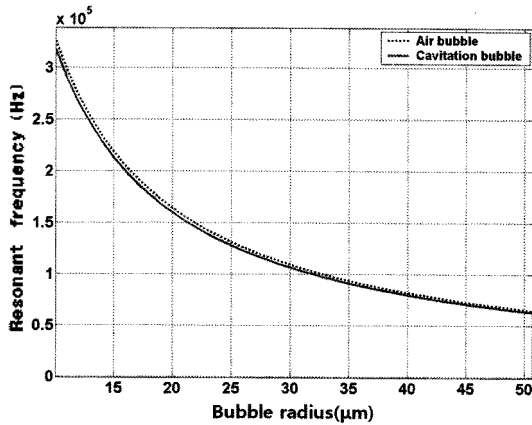


그림 12. 캐비테이션 기포와 공기 기포의 공진주파수 비교
 Fig. 12. Comparison of resonant frequency of cavitation bubble vs. air bubble.

기포는 15.95 μm, 공기 기포는 16.38 μm이며, 0.43 μm의 차이가 발생된다. 그러므로 공기 기포의 공진 주파수와 캐비테이션 기포의 공진 주파수의 차이를 고려하여 캐비테이션 기포의 크기와 분포량을 구할 수 있다. 그러나 두 기포의 물리적 특성의 차이에도 불구하고 캐비테이션 기포를 공기 기포로 가정하여 구하여도 그 차이가 매우 작다. 그러므로 본 실험의 캐비테이션 기포의 크기와 분포량 관측 결과는 적절한 값이라고 볼 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국해양연구원이 수행하고 있는 “유비쿼터스 해양 유용/유해생물 관리 기술 개발 (PP00750)”과 국방과학연구소 연구비 (계약번호:UD060009DD) 지원으로 수행되었습니다. 또한 국방과학 연구소 박정수 박사님의 도움으로 ABS 장비를 이용하여 실시되었습니다.

참고 문헌

1. Y. Lecoffre, *Cavitation; bubble trackers*, A.A. Balkema, Netherlands, pp. 1-6, 1999.
2. D. Lohse, "Bubble puzzles," *American Institute of Physics*, pp. 36, Feb. 2003.
3. C. S. Clay and H. Medwin, *Acoustical Oceanography*, John Wiley & Sons, NY, 1977, pp. 469-472.
4. C. E. Brennen, *Cavitation and bubble dynamics*, Oxford University Press, NY, 1995, pp. 7-9, 163-186.
5. F. Ronald Young, *Cavitation*, McGRAW-HILL Book company, London, 1989, pp. 164.
6. W. Lauterborn, *Cavitation and Inhomogeneities in under-*

water acoustic, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1980, pp. 187-193

7. J. W. Caruthers and P. A. Elmore, "An iterative approach for approximating bubble distributions from attenuation measurements," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 106, no. 1, July 1999.
8. R. Duraiswami, S. Prabhukumar and G. L. Chahine, "Bubble counting using an inverse acoustic scattering method," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 104, no. 5, November 1998.
9. 김병남, 윤석왕, 최복경, "수중 기포에 의한 비선형 음파의 증폭과 지향성," *한국음향학회지*, 22권, 1호, 250-260쪽, 2003.
10. S. Vagle and D. M. Farmer, "A comparison of four methods for bubble size and void fraction measurements," *IEEE journal of oceanic engineering*, vol. 23, no. 3, 1998.
11. H. Medwin and C. S. Clay, *Fundamentals of Acoustical Oceanography*, Academic Press, 1998, pp. 293-298.
12. B. K. Choi, B. C. Kim, B. N. Kim, S. W. Yoon, "Assessment of Acoustic Iterative Inverse Method for Bubble Sizing to Experimental Data," *Ocean Science Journal*, vol. 41, no. 4, 2006.
13. B. K. Choi and S. W. Yoon, "Acoustic bubble counting technique using sound speed extracted from sound attenuation," *IEEE J.Oceanic Eng.*, vol. 26, no. 1, 2001.
14. 최복경, 김병남, 윤석왕, "수중에서 결맞음 음향기술을 이용한 기포분포 추정기법의 실험적 검증 및 논문비교 연구," *한국음향학회 2001년도 학술대회 논문집*, 20권, 1호, 2001.
15. X. M. Liu, J. He, J. Lu, X. W. Ni, "Effect of surface tension on a liquid-jet produced by the collapse of a laser-induced bubble against a rigid boundary," *Optics & Laser Technology*, vol. 41, no. 1, pp. 21-24, 2009.
16. Z. Y. Zhang and H. S. Zhang, "Surface tension effects on the behavior of a cavity growing, collapsing, and rebounding near a rigid wall," *Phys. Rev. E* 70, 056310-1, 2004.

저자 약력

• 김 대 옥 (Daeuk Kim)



2005년 8월: 한양대학교 지구해양 이학사
 2009년 2월: 한양대학교 수중음향 이학석사
 ※주관심분야: 음파 산란

• 나 형 술 (Hyoungsul La)

한국음향학회지 제25권 8호 참조

• 최 지 용 (Jee Woong Choi)



1996년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 (이학사)
 1998년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 (이학석사)
 2002년 8월: 한양대학교 지구해양과학과 (이학박사)
 2002년 11월~2007년 8월: Applied Physics Lab., Univ. of Washington, USA, Research Associate
 2004년~ 현재: 미국음향학회 수중음향 기술위원회 위원
 2007년 9월~ 현재: 한양대학교 해양환경과학과 조교수
 ※주관심분야: 수중 음향

• 나 정 열 (Jungyul Na)

한국음향학회지 제21권 8호 참조

• 강 돈 혁 (Donhyug Kang)

1992년 2월: 한양대학교 지구해양 이학사

1994년 8월: 한양대학교 수중음향 이학석사

2002년 2월: 한양대학교 수중음향 이학박사

2005년 12월~ 현재: 해양연구원 선임 연구원

※주관심분야: 수산 음향