

향적 산란신호의 모델링과 실험적 검증

Modeling of Scattered Signal from Ship Wake and Experimental Verification

지 윤 희*, 이 재 훈*, 김 재 수*, 김 정 해**, 김 우 식***, 최 상 문***
 (Yoon-Hee Ji*, Jae-Hoon Lee*, Jea-Soo Kim*,
 Jung-Hae Kim**, Woo-Shik Kim***, Sang-Moon Choi***)

*한국해양대학교 해양개발공학과, **LIG 넥스원(주), ***국방과학연구소
 (접수일자: 2008년 9월 8일; 수정일자: 2008년 10월 30일; 채택일자: 2008년 12월 16일)

이동하는 수상 운동체는 반경 8~200 μm 크기의 미세기포군을 포함하는 기포향적을 발생시킨다. 경우에 따라 10여분 이상 지속되는 수중 미세기포는 음향산란을 일으키는 요인이 되며, 기포가 존재하는 동안 능동소나에 의한 지속적인 탐지가 가능하다. 본 논문에서는 기포향적에 존재하는 미세기포의 사공간적인 분포변화에 따라 산란되는 음파를 모의하는 잔향음 모델을 제시하였다. 기포향적 산란신호의 모델은 음향학적 모델과 운동학적 모델로 이루어져 있으며 음향학적 모델에서는 미세기포의 공간분포를 체적산란강도로 변환하여 공간에 대한 적분을 수행하고, 운동학적 모델은 해양공간의 고정좌표계와 능동소나에 고정된 국부좌표계 사이의 좌표변환을 위한 오일러변환을 기반으로 구현되었다. 구현된 모델의 검증을 위해 2007년 9월 한국해양대학교 앞 해상에서 실제 선박을 운항하여 기포향적을 발생시킨 후 일정간격으로 신호를 획득하여 분석하였고, 이를 모델에 적용하여 타당성을 검증하였다.

핵심용어: 잔향음, 기포향적, 미세기포, 향적 산란신호, 체적산란강도

투고분야: 수중음향 분야 (5.2)

A moving surface vessel generates a ship wake which contains a cloud of micro-bubbles with radii ranging between 8~200 μm . Such micro-bubbles can be detected by active sonar system for more than ten minutes depending on the size and speed of the surface vessel. In this paper, a reverberation model for the ship wake is presented. The developed model consists of the acoustic scattering model due to the distribution of the micro-bubbles and the kinematic model for the moving active sonar. The acoustic scattering model is based on the volume integration, where the volume scattering strengths are obtained from the spatial distribution of micro-bubbles. Since the directivity and look-direction of active sonar are important factors for moving active sonar, the kinematic model utilizes the Euler transformation to obtain the relative motion between the global and local coordinates. In order to verify the developed model, a series of sea experiment was executed in September 2007 to obtain the spatial-temporal distribution of a bubble cloud, and analyzed to be compared with the simulation results.

Keywords: Reverberation, Ship Wake, Micro-Bubbles, Scattered Signal, Volume Scattering Strength

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5.2)

I. 서론

수상 운동체의 이동으로 의해 후방에는 하얀 물거품과 같은 많은 양의 미세기포가 발생하게 되어 이동자취를 남긴다. 이를 기포향적 (Ship Wake)이라고 하며, 발생은 프로펠러 회전에 의한 공동현상 (propeller-cavitation)

과 선수선미부의 형상에 의한 쇠파 (breaking waves) 그리고, 선체 경계층의 공기유입 (entrainment of air)에 주로 기인한다 [1].

기포향적에 포함되는 미세기포의 반경은 8~200 μm 의 크기로 해수 중에 수십 분 이상 잔존하여 음향산란에 영향을 미친다고 알려져 있다 [2]. 기포의 수명은 부력효과에 의한 기포의 상승률, 기포의 성장과 붕괴, 수축 등의 물리적 요인에 의해 결정되며, 200 μm 이상의 큰 기포는 빠른 시간 내에 해수면으로 상승하여 소멸하고 8 μm

책임저자: 김 재 수 (jskim@hhu.ac.kr)
 606-791, 부산시 영도구 동삼동 1번지
 한국해양대학교 해양개발공학과 수중음향연구소
 (전화: 051-410-4325; 팩스: 051-403-4320)

이하의 작은 기포는 수압에 의해 소멸하게 된다. 해수 중에 잔존하는 미세기포는 해수면을 따라 깊게 연결되어 수평으로 넓어지면서 해수표층에 음향학적 반사층을 형성하여 기포가 사라질 때까지 음파의 산란을 일으킨다. 이러한 기포의 음향산란현상은 능동소나를 이용하여 기포향적의 탐지를 가능하게 한다. 따라서, 오랜 시간 음향산란을 일으키는 기포층에 의한 산란신호의 특성을 파악하여, 기포의 시·공간적 분포에 따른 산란신호의 지속성에 관한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 잔향음 (reverberation) 이론을 바탕으로 미세기포의 분포에 따른 산란신호의 모의를 위한 알고리즘을 구현하였다. 그리고 알고리즘의 검증을 위한 실측신호의 획득은 2007년 9월 실시한 한국해양대학교 앞 바다 해상시험에서 고주파수의 음향센서를 이용하여 실제 선박의 이동속도와 궤적에 따라 발생하는 기포향적의 산란신호를 지속적으로 획득하였고, 동시에 고공촬영을 통해 해수면에 남는 기포향적의 기하학적 형상을 확인하였다. 해상시험을 통해 획득된 실측신호의 분석을 통해 수중 기포집단의 거동과 존속여부를 확인하였고, 알고리즘의 검증을 위해 분석결과를 적용하여 모의된 신호와 실측신호를 실험적으로 비교·검증하였다.

II. 기포향적의 음향산란

해수 중에 잔존하는 기포는 방사형의 수축과 팽창운동을 반복하여 진동하게 되고, 입사파에 의해 공진이 발생하는 경우, 큰 음향산란강도 (acoustic scattering strength) 를 나타낸다. 이러한 미세기포의 입사파에 대한 응답은 기포 반경과 공진 주파수의 관계에 의해 결정되며, 그 관계는 식 (1)으로 표현된다 [3].

$$f_r = \frac{1}{2\pi a} \left(\frac{3\gamma P_0}{\rho} \right)^{1/2} \quad (1)$$

여기에서, f_r 은 공진주파수 (Hz), a 는 기포반경 (cm), γ 는 기체의 비열비 (=1.4), P_0 는 유체 정역학적 압력 (=10⁶ dyne/cm²), ρ 는 물의 밀도 (=1 g/cm³)를 나타낸다.

기포향적에 존재하는 반경 8~200 μ m의 미세기포는 식 (1)에 의해 주파수 범위 10~400 kHz에서 강한 공진을 나타내게 되고, 공진현상이 발생하면 기포의 진폭은 최대가 되어 입사파로부터 최대 에너지가 방출된다. 에너지의 일부는 진동하는 기포에 의해 모든 방향으로 산란되

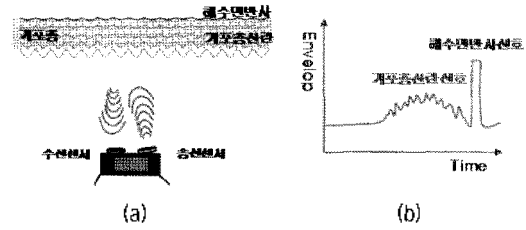


그림 1. (a) 기포향적 산란 모식도, (b) 산란신호의 특성
Fig. 1. (a) Experimental setup for scattering from ship wake. (b) Envelope of scattered signal.

고, 나머지는 기포 내 열진도와 주위 해수의 점성 및 기포 표면의 표면장력에 의해 열로 변환된다 [4].

기포향적이 존재하지 않는 경우, 음파의 산란은 일반적으로 해상풍에 의해 발생하는 해수표층의 기포 및 해수면 거칠기, 수중 부유물 등에 의해 발생된다. 반면에 그림 1 (a)와 같이 수상 운동체의 이동으로 많은 양의 미세기포가 발생되어 해수면 부근에 수m 두께의 기포층이 형성된 경우, 센서로부터 방출된 음향에너지가 기포경계층에서 변형되어 지속적으로 강한 잔향이 발생된다.

잔향음은 수중에서 방출된 음파가 다양한 경로로 전파되면서 불균질한 경계면에 전파사 또는 산란되어 수신되는 시간에 따른 총합이다. 이는 송신신호와 같은 주파수 특성을 나타내며, 산란체와의 거리 및 송신신호의 세기에 따라 그 신호의 세기 (intensity)가 달라져 소음 (noise)과 구별되는 특징을 가진다 [5].

기포향적의 산란신호는 해수면 아래 소나플랫폼에 부착된 음향센서에서 해수면을 향하여 송신한 고주파수의 음파가 기포층을 포함하는 입사체적과 해수면 경계층에서 산란반사되어 수신단에 들어온다. 이 신호의 특성은 그림 1 (b)와 같은 형태를 나타내며, 해수면 반사신호가 수신되기 전에 기포층에 의한 산란신호가 먼저 수신되고 해수 중에 잔존하는 미세기포의 시·공간적 분포변화에 따른 체적산란강도 (volume scattering strength)에 의해 신호의 크기 (amplitude)가 결정된다.

III. 향적 산란신호의 모델링

1. 운동학적 모델

수상 운동체와 해수면 아래에 위치하는 음원, 즉, 능동 소나와의 상대적인 운동에 따른 좌표변환을 위해 회전변환 알고리즘인 오일러 변환 (Euler transform)을 적용하였다. 이에 따른 공간상 좌표계의 설정은 그림 2와 같이 해양공간을 정의하며, 수상 운동체의 위치를 표시하는

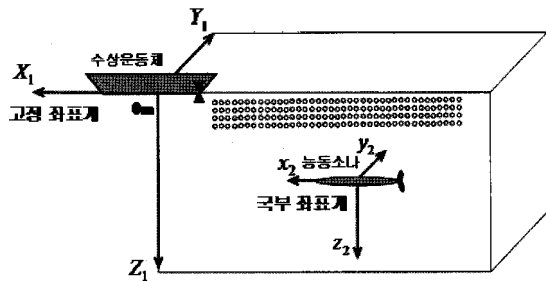


그림 2. 운동학적 모델의 좌표계 설정
Fig. 2. Definition of the coordinate system for kinematic model.

고정 좌표계 (global coordinate: X, Y, Z)와 음원에 정의된 국부 좌표계 (local coordinate: x, y, z)로 정의된다.

해수면 아래 음원은 직선운동과 함께 x_2 축 중심의 좌우 흔들림 (rolling), y_2 축 중심의 앞뒤 흔들림 (pitching), z_2 축 중심의 선수 흔들림 (yawing)의 회전운동을 정의하여 6자유도 운동성분을 모두 고려하였다. 회전운동은 기하학적 축(x_2, y_2, z_2) 중심의 회전 운동각 (Euler angle) φ, θ, ψ 에 의해 정의된다. 이러한 음원의 축 회전운동으로 형성되는 음파의 입사체적과 해수면 입사면적의 좌표는 식 (2)을 이용해 고정 좌표계로 변환하여 해양공간상에 나타낼 수 있다 [6].

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서, (X_1, Y_1, Z_1) 는 해양공간에 정의된 선박의 위치를 나타내는 좌표, (X_2, Y_2, Z_2) 는 오일러 좌표변환된 음원의 좌표, (x_2, y_2, z_2) 는 움직이는 음원에 고정된 국부좌표이다.

오일러 좌표변환을 적용함으로써 선박과 공간적 거리를 두고 움직이는 해수면 아래 음원의 직선운동 및 회전운동에 의해 형성되는 빔 패턴 (beam pattern)의 방향성을 알 수 있다. 따라서, 음원으로부터 음파가 전달되면서 해양공간상의 입사체적과 해수면에 입사되는 면적으로의 좌표변환이 용이하여 어떠한 운동성분으로 정의하여도 기하학적 잔향음의 해석이 가능하다.

2. 음향학적 모델

음파는 구형확산 (spherical spreading)을 가정하여 전파되며, 그림 3과 같은 구형 좌표계의 수직각 (elevation angle: φ), 수평각 (azimuth angle: θ), 음원에서 산란체 (scatterer)까지의 거리 r 에 의해 입사체적과 입사면

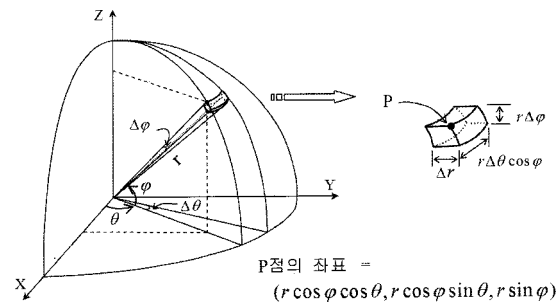


그림 3. 음향학적 모델의 구형 좌각 좌표계
Fig. 3. Spherical coordinate system for acoustic model.

적이 결정된다 [7]. 입사체적과 면적의 공간적 위치는 빔 패턴 즉, 수직·수평각 (φ, θ)에 의해 달라지며, 균일한 격자 ($\Delta r, \Delta \varphi, \Delta \theta$)로 분할하여 단위체적 (cell)의 적분을 수행하여 계산한다.

다양한 경로로 전파되는 음파는 음향에너지의 일부가 열 형태로 변화되어 발생하는 흡수손실과 해양의 불균질성에 의한 산란의 결과로 전달거리에 따라 음의 세기가 감소된다. 흡수손실 (absorption loss)은 주로 유체점성, 이온 화합물 ($MgSO_4, B(OH)_3$)의 마찰로 발생하며, 주파수에 강한 의존성을 보인다 [8][9]. 따라서 전달손실 (Transmission Loss, TL)은 음파의 전달거리에 따른 확산손실과 흡수손실의 합으로 식 (3)과 같이 계산된다 [4].

$$TL = 10 \log_{10}(r^2) + \alpha r \times 10^{-3} \text{ (dB)} \quad (3)$$

여기서, α 는 $\frac{0.075f^2}{(0.8^2 + f^2)} + \frac{36f^2}{(5000 + f^2)} + 4.1 \times 10^{-4}f^2$ 로 계산되는 흡수손실 계수 (dB/km)이며, f 는 사용 주파수 (kHz), r 은 음파의 전달거리 (m)이다.

잔향음 모델에서는 해수면 부근의 기포층에 산란·반사되어 수신되는 산란신호의 모의를 위해 식 (4), (5), (6)의 소나방정식을 사용하여 잔향음 준위를 계산한다 [4].

$$RL_s = SL - 2TL + S_s + 10 \log_{10} A + BPT + BPR \quad (4)$$

$$RL_v = SL - 2TL + S_v + 10 \log_{10} V + BPT + BPR \quad (5)$$

$$RL_r = SL - 10 \log_{10}(4d^2) + S_r \quad (6)$$

RL_s 은 해수면 잔향음 준위 (dB re 1 μ pa), RL_v 은 체적 잔향음 준위 (dB re 1 μ pa), RL_r 은 해수면 반사준위 (dB re 1 μ pa), SL 은 음원준위 (dB re 1 μ pa & 1 m), TL 은 전달손실 (dB re 1 m), d 는 해수면에서 센서까지의 수심 (m), S_s 는 단위면적당 해수면산란강도 (dB re 1 m²), S_v 는 단위체적당 체적산란강도 (dB re 1 m³), S_r 는 해수면

반사손실 (dB re 1 m), A 와 V 는 각각 입사면적과 입사체적, BPT/BPR 은 송/수신 빔 패턴이다.

3. 음향학적 모델의 알고리즘

해양에서의 음향산란은 해수면 상태에 의해서 다양한 특성을 나타내지만, 본 논문의 주 관심사인 미세기포로 구성된 기포향적에 의한 음향산란은 수상 운동체에 의해 발생된 기포의 분포변화에 따른 체적산란강도에 크게 의존하여 다르게 나타난다. 체적산란강도 (S_v)는 시간 (t), 수심 (z), 기포반경 (ϕ), 그리고 기포반경에 따른 산란 단면적 (σ)과 단위체적당 기포의 개체수 (N)의 함수로 정의되어 식 (7)으로 표현할 수 있다 [10][11]. 식 (7)에서는 해양공간의 단위체적에 존재하는 기포군의 다양한 반경과 개체수에 대해 시·공간적 변화를 고려한 직분을 통해 체적산란강도를 계산한다. 그러나 현재로써는 다양한 경우의 기포발생 조건에 따라 발생하는 해양공간상에 기포 반경의 분포를 확인하고, 신뢰할 수 있는 추정방법이 없다. 따라서, 본 논문에서는 해양공간상에 기포향적의 분포를 수치적인 방법을 통해 균일분포 (homogeneous distribution)와 가우시안 정규분포 (gaussian distribution)를 선택적으로 정의할 수 있도록 하고, 이를 체적산란강도로 변환하여 처리하도록 하였다. 해수면산란강도 (sea-surface scattering strength)의 경우, Chapman-Harris의 실험식을 적용하여 식 (8)으로부터 계산되었다 [12]. 식 (8)은 저주파수의 산란인 경우 사용되는 모델로 본 논문에서 제시하는 400 kHz 이상의 고주파수 산란모델에 적용한 경우 실제로 많은 차이를 나타내는 단점을 가지고 있다.

여기서, $\beta = 150(\nu f^{1/3})^{-0.38}$ 이고 θ 는 입사각도, ν 는 해상풍 (m/s), f 는 사용주파수 (Hz)이다.

$$S_v = 10 \log_{10} \left(\int \sigma(\phi) N(t, \phi, z) dV \right) \quad (7)$$

$$S_s = 3.3\beta \log_{10} \left(\frac{\theta}{30} \right) - 12.4 \log_{10}(\beta) + 2.6 \quad (8)$$

전향음 신호를 모의하기 위해 그림 4와 같이 첫 번째로 기포향적의 분포를 선택적으로 정의하고, 해양공간에 분할된 단위체적 내에 무작위 (random) 위상을 가지는 산란체를 배치하여 음원까지의 거리에 따른 전달손실과 송/수신 빔패턴을 계산한다. 다음으로 시지연 신호의 모의 시 계산시간을 줄이기 위해 200 μ m의 시간영역의 음원 신호를 FFT (Fast Fourier Transform) 알고리즘을 이용하여 주파수 영역에서 계산한다. 주파수 영역에서 음원과 산란체 사이의 거리 차에 따른 시지연 (time-delay)을

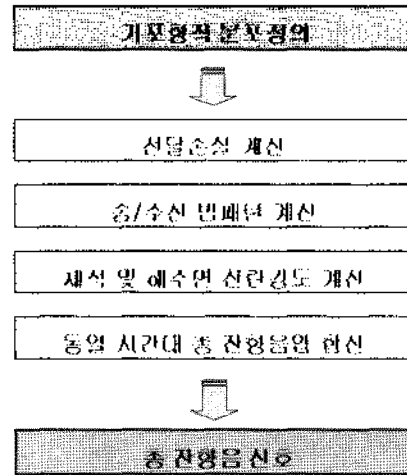


그림 4. 기포향적 산란신호 모의 알고리즘 흐름도
Fig. 4. Flow chart for simulation of scattered signal from ship wake.

고려한 후, 이를 IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) 알고리즘을 이용하여 다시 시간영역의 신호로 변환한다. 마지막으로 앞서 정의된 기포향적 분포에 따른 단위체적 내의 산란체와 해수면에서의 산란강도를 결정하고, 식 (4), (5), (6)에 보는 바와 같이 음원순위, 전달손실, 빔패턴 및 부피/면적, 그리고 기포향적의 분포를 모두 고려하여 계산된 각 산란체에 의한 신호의 크기를 시간영역의 시지연 신호에 곱해 주어 각 산란체로 부터의 산란신호를 계산한다.

이렇게 계산된 모든 단위체적 내에 존재하는 각각의 산란체로 부터의 산란신호는 동일 시간대에 대한 총 합산을 하여 최종 전향음 신호를 모의한다.

IV. 해상시험과 모델검증

1. 해상시험의 구성

2007년 9월 11일~13일 3일 동안 한국해양대학교 앞바다에서 기포향적 산란신호의 획득을 위한 해상시험을 수행하였다. 송·수신 음향센서는 RRSON사의 TC3029 2개를 사용하여 그림 5와 같이 고정치구에 부착하고 해저면에 고정시켰다. 항적 발생 수단으로는 총동수 (Gross T.) 26,00 ton의 해양대 "아치호"를 운항하였고, 발생된 기포향적 형성의 촬영을 위해 고도 180~200m 상공에서 RC 헬기를 운용하였다.

그림 5와 같이 2개의 음향센서가 고정된 바로 위 지점을 0 m/sec로 기준하여 해수면에 부이표시하고 5 m의 간격으로 이동하여 20 m/sec까지 "아치호"를 반복 운항

하였다. 시험방법은 표 1과 같이 주파수, 아치호의 이동 속도와 궤적의 변화에 따른 음향산란신호를 획득하였다.

신호의 획득과 함께 고공촬영을 통하여 그림 6에 보이는 기포향적의 기하학적 형상을 확인하였다. "아치호"의 이동방향의 뒤를 따라 발생하는 대표적인 향적형상인 V자 모양의 Kelvin 향적을 확인할 수 있으며, 선체의 형상에 따른 쇄파와 프로펠러에 의해 발생하는 향적의 영역을 육안으로 확인할 수 있었다 [13].

그림 6과 같은 기포향적에 의한 산란신호의 획득방법은 200 μm의 정현파 신호를 송신한 후, "아치호"의 이동

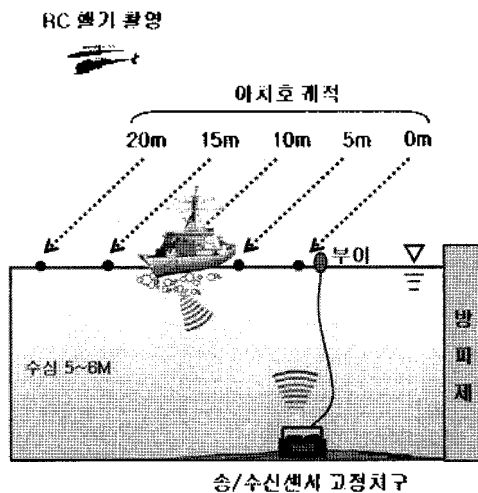


그림 5. 해상시험 구성도
Fig. 5. Schematics of sea experiment.

표 1. 시험방법
Table 1. Experiment cases

Case	주파수 (kHz)	궤적 (m)	속도 (kts / rpm)
Case	430	0.5, 10, 15, 20	6 / 850
	450		9 / 1300
	470		12 / 1600

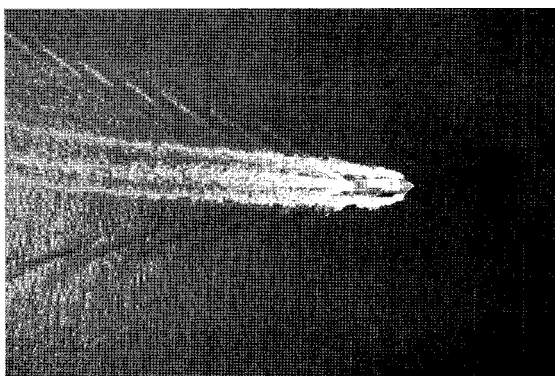


그림 6. 향적의 형상
Fig. 6. Bird's eye view of the ship wake.

으로 발생한 향적 내 미세기포에 의해 산란되어 돌아오는 수신단의 신호를 실시간모니터링으로 확인하여 기포가 소멸되었다고 판단될 때 까지 매 10초 간격마다 산란신호를 저장하였다. 이때 사용된 센서의 주파수 대역에서 수신감도 (RVS)는 $-195 \text{ dB re } 1 \text{ V}/\mu\text{Pa at } 1 \text{ m}$ 이고, 각 중심주파수를 100 kHz로 변화시켜 500 kHz로 표본화 (sampling) 하여 저장하였다.

신호의 획득은 9월 11-12일 이틀에 걸쳐 이루어져 주파수 450 kHz의 경우 9월 11일에 수행되었으며, 당시 기상청의 관측자료에 따르면 평균풍속 1.7 m/sec로 잔잔한 해상상태를 유지하였다. 주파수 430과 470 kHz의 경우 신호의 획득은 9월 12일에 수행되었으며, 전일 보다 해수면이 거칠어져 백파(whitecap)가 보이기는 하였으나 평균풍속 2.8 m/sec으로 비교적 안정적 이었다.

2. 분석 결과

그림 7은 주파수 450 kHz, 속도 12 kts인 경우 획득된 산란신호로 기포향적의 존재 유·무에 따른 산란신호의 변화를 확인하였다. 그림 7 (a)은 향적이 발생되기 전에 수신된 신호로 해수면 반사신호만 수신되지만, 그림 7 (b)의 "아치호"가 음향센서 위를 통과하고 난 60초 후의 수신신호에서는 해수면 반사신호가 수신되기 전에 해수체적에 존재하는 기포층에 의한 산란신호가 수신되는 것을 확인할 수 있다.

체적산란강도는 미세기포의 공간적 밀도 (density)와 밀접한 비례 관계를 가지고 있으며, 이를 이용하면 수중 기포군의 분포와 산란신호의 지속성에 대한 정보를 알아 낼 수 있다. 본 논문에서는 산란신호의 진폭 (amplitude)을 결정하는 기포의 체적산란강도를 도출하기 위해 실측

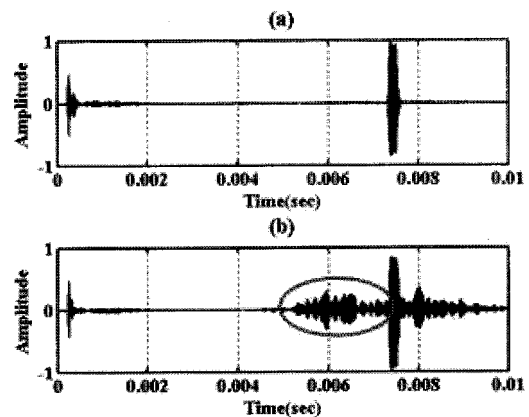


그림 7. 향적 (a)발생 전과 (b)발생 60초 후의 산란신호 비교
Fig. 7. Measured signals. (a)without ship wake and (b)60 seconds after ship wake

산란신호를 분석하였다. 10초 간격마다 획득된 시간신호를 힐버트 변환하고, 음향센서의 RVS (Receiving Voltage Sensitivity)와 TVR (Transmitted Voltage Response)을 고려한 후 식 (4)을 이용하여 수심을 1 cm 간격으로 균일하게 나누어 수심별 미세기포의 체적산란강도를 정량화하였다.

음향산란의 지속여부에 대해 확인하기 위해 0 m 궤적 인 경우의 체적산란강도만을 수심 (depth)과 경과시간 (elapsed time)에 대해 그림 8에 표현하였으며, 각각 주파수와 선박의 이동속도에 변화에 대해 나타내었다 [14]. 해수면은 수심 0.5~1 m 부근에 약 -20 dB의 강한 산란 강도를 나타내며 검은색 띠로 표현된 부분이다. 기포층은 대략 -40~-60 dB의 산란강도를 나타내었고 해수면 아래 1.5~3 m까지 확산되어 형성되는 것을 확인할 수 있다. 각 그림별로 해수면 위치의 변화가 발생하는 것을 볼 수 있는데, 그 원인은 국립해양조사원 (NOU)의 관측 결과에 의하면 시간신호를 획득하는 당일 분당 0.3 cm의 조수간만 차에 따른 해수면 수위의 변화에 의한 결과이다. 그림 8에서 "아치호"의 이동속도 변화에 대해 그림 8 (b), (c)의 9 kts 경우 보다 그림 8 (e), (f)의 12 kts 경우 일 때 기포의 밀도가 높고 공간적으로 넓게 확산되어 분포한 것을 확인하였고, 같은 이동속도의 경우를 비교하면 주파수에 따라 반응하는 기포의 특성이 다양하게 나타내는 것을 확인하였다. 430 kHz의 경우 이동속도 변화에 대해 뚜렷한 차이점이 나타나지 않는 이유는 "아치호"가

음향센서를 고정시킨 바로 위 0 m 궤적을 벗어나 운항되었기 때문이다. 해수 중의 기포들은 시간이 경과함에 따라 하강과 상승의 운동을 반복하며, 최소 300초 (5분) 이상 해수 체적 내에 존재하여 지속적으로 음향산란을 일으키는 것을 실험적으로 확인하였다. 또한, 이 경우 항적이 발생된 후 고정된 지점에서 300초 이상 산란신호가 수신된다는 것은 속도별 9 kts의 경우 1.5 km, 12 kts의 경우 2 km만큼 수상 운동체와 떨어진 거리에서도 기포항적에 의한 음향산란현상이 나타난다는 것을 의미한다.

그림 8의 경우 중 음향센서의 주파수에 대한 반응이 안정적인 (e)와 450 kHz, 12 kts의 경우 획득된 모든 궤적 0~20 m에 대해 경과시간에 따른 체적산란강도의 변화를 그림 9와 같이 나타내어 기포의 사·공간적 분포 및 기동양상을 확인하였다. x축은 선박이 지나간 궤적에 따른 거리를 나타내고, y축은 시간영역의 신호에서 해저면에 고정시킨 송/수신센서로 부터의 거리를 환산하여 수심으로 나타내고 있다. 기포항적이 발생되기 직전의 0초 인 경우 해수 중에 산란체가 존재하지 않는 조용한 수중 환경이나 발생 후에는 해수면 아래 2~4 m까지 기포가 분포하며 매우 강한산란을 일으키는 산란체의 역할을 하는 것을 알 수 있다. 기포항적 발생된 후 0~160초로 시간이 경과됨에 따라 기포군이 공간적으로 확산되면서 밀도가 점점 감소되는 소멸과정을 보이고 있다. 이처럼 수중의 2차원 단면에 시간변화에 따른 분포를 나타내어 기포군의 움직임을 시각적으로 확인할 수 있었다.

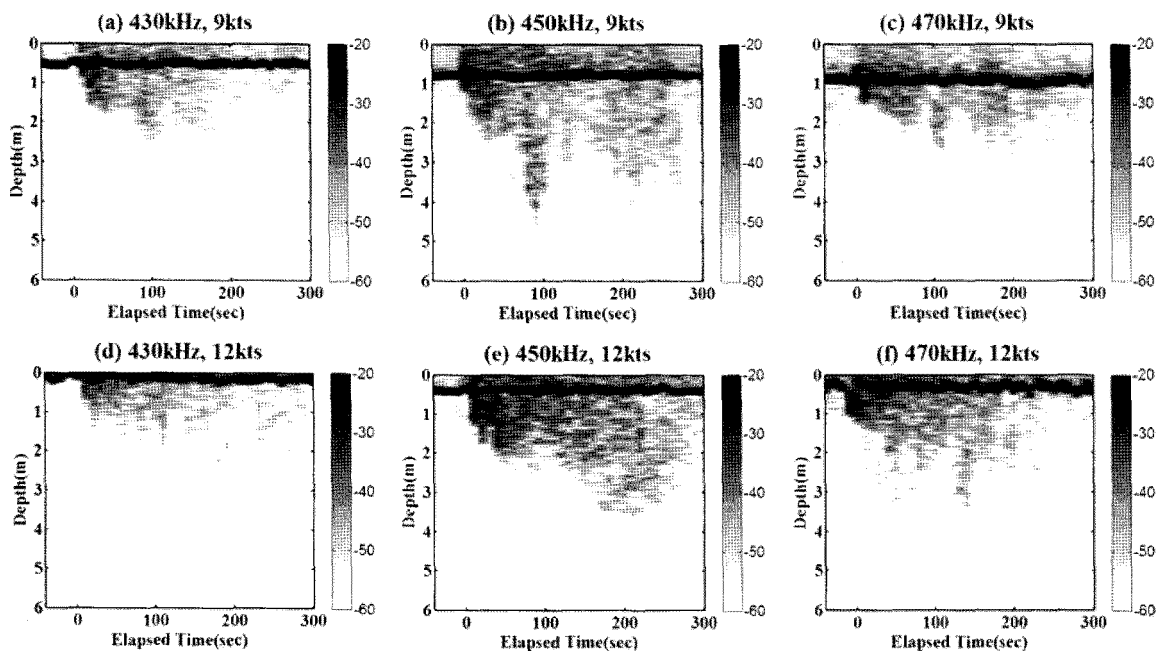


그림 8. 경과시간에 따른 수중기포의 체적산란강도의 변화 (Color bar 단위: dB)
 Fig. 8. Volume scattering strength as a function of elapsed time (Color bar Unit: dB).

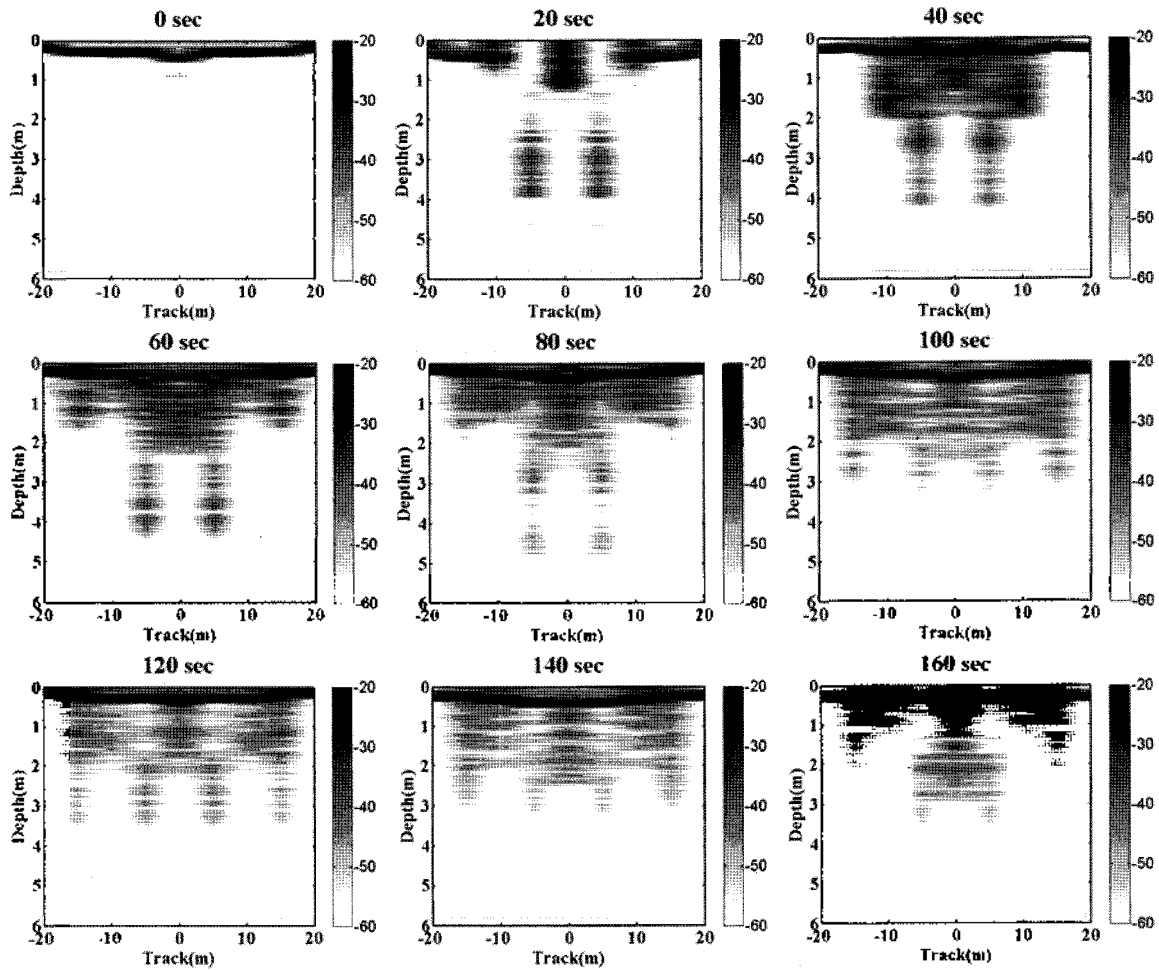


그림 9. 450 kHz, 12 kts 인 경우 수중 2차원 단면의 기포분포 (Color bar 단위: dB) [15]
 Fig. 9. 2D contour of bubble distributions for the case of 450 kHz and 12 kts (Color bar Unit: dB) [15].

3. 자료동화를 통한 알고리즘의 검증

본 논문에서 제시하는 잔향음 모델의 알고리즘은 음향 산란을 일으키는 기포향적의 분포를 공간상에 임의로 정의하여 신호를 모의한다. 알고리즘의 검증을 위해 해상 시험의 분석결과로 확인한 기포의 체적산란강도를 자료화 (data base)하여 모의수치실험에 활용하였고, GUI (Graphical User Interface)를 구성하여 실측신호와 모의 신호의 비교를 용이하도록 하였다.

신호의 모의를 위해 음파가 송신된 후, 모든 수심에 분포하고 있는 기포향적에 의해 산란된 신호로부터 획득된 체적산란강도를 수심에 대해 1 cm 간격마다 정량화한 실측 체적산란강도로 정의하였다 [16]. 0 m 궤적에서 주파수 450 kHz, 이동속도 12 kts 인 경우의 신호를 모의하였고, 알고리즘에 적용된 기포향적 발생 120초 후의 실측 체적산란강도는 그림 10과 같다. -20 dB의 가장 높은 산란강도를 나타내는 부분이 해수면이고, 해수면 이전의 기포군에 의한 체적산란강도가 -35~-60 dB로 나타난다.

수중 배경소음은 백색잡음 (white noise)으로 가정하

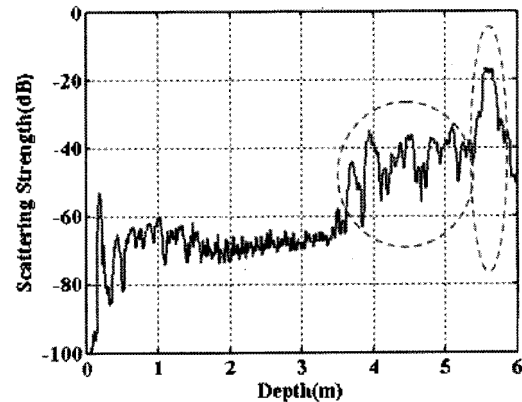


그림 10. 신호모의 시 사용된 항적발생 120초 후 수심에 대한 체적산란강도
 fig. 10. Distribution of volume scattering strength as a function of depth at 120 seconds after the generation of the ship wake.

고, AWGN (Additive White Gaussian Noise)를 적용하여 모의된 신호에 잡음 (noise)을 섞었으며, 모의신호와 실측신호의 특성비교는 그림 11과 같다.

그림 11 (좌) 실측 신호의 0~0.002 sec 사이에 처음

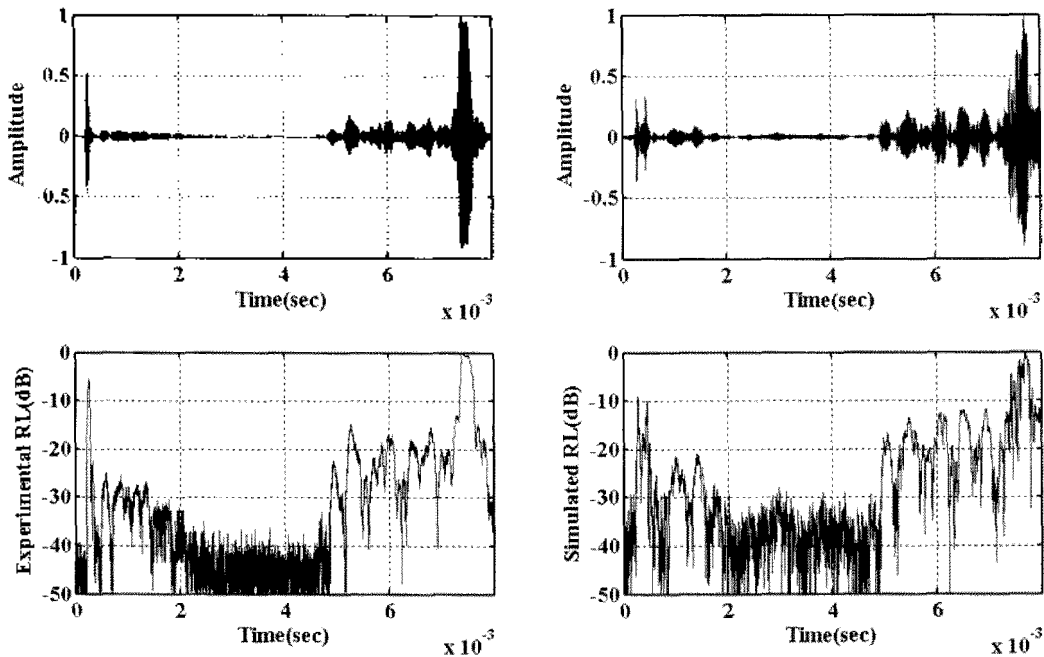


그림 11. 실측신호 (좌)와 모의신호 (우)의 시간 신호와 잔향음 준위 특성 비교
 fig. 11. Time series and reverberation level for measured signal (left) and simulated signal (right).

신호가 시작하는 부분의 신호크기가 크게 나타나는 이유는 송·수신 센서를 나란히 배치한 결과로 송신센서의 부엽 (side lobe)에 의해 수신단에 들어온 수신신호이다. 그림 11 (우) 모의 산란신호의 0~0.002 sec 사이에 실측신호 형태와 달리 모의된 신호 부분은 침묵 체적산란강도를 적용하여 각 단위체적에서 산란된 신호를 총 합산할 때, 200 μm 의 음원신호를 컨볼루션 (convolution)하는 과정에 의해 음원신호의 펄스길이 만큼 신호가 늘어지면서 나타난 현상이다. 모의된 잔향신호의 해수면 반사부분에 나타나는 신호형태는 간섭현상으로 해수면을 포함하는 모든 단위체적 내에 산란체를 무작위로 배치시켜 신호를 모의한 결과이다. 해수면 반사신호 이전의 나타나는 기포층의 잔향신호 부분은 실측신호와 약간의 편차가 있었으나 신호의 형태가 실측신호와 유사하게 구현되었고, 이 경우 이외에도 대부분 신호특성이 잘 일치하는 것을 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 해수 중에 존재하여 매우 강하고 지속적으로 음향산란을 일으키는 기포향적 산란신호를 모의하기 위한 알고리즘을 제시하였다. 또한, 실험적 검증을 위해 2007년 9월 한국해양대학교 앞바다에서 실제 선박을 운항하여 해상시험을 수행하였다.

알고리즘은 잔향음 이론을 적용한 음향학적 모델 (acoustic model)에 운동학적 모델 (kinematic model)을 적용하여 구현하였다. 음향학적 모델은 미세기포의 후방산란으로 발생하는 체적 잔향음, 해수면 잔향음, 그리고 해수면 반사를 고려하여 각 단위체적에서의 잔향음압을 총 합산하여 신호를 모의한다. 또한, 운동학적 모델을 통해 능동소나의 회전운동에 따른 기하학적 잔향음의 해석이 가능하도록 하였다.

해상시험은 음향센서의 주파수와 “아치호”의 이동속도와 궤적의 변화를 주어 수행하였다. 실측 산란신호를 분석하여 해수 중 미세기포의 체적산란강도가 -35 ~ -60 dB으로 나타나는 것을 확인하였고, 수심에 따라 정량화할 수 있었다. 또한, 주파수와 이동속도변화에 따라 0m의 고정된 지점에서 획득된 산란신호로부터 기포향적에 의한 음향산란이 최소 300초 이상 지속되는 사실을 확인할 수 있었다. 그리고 모든 궤적 (0~20 m)에 대해 주파수 (430 kHz, 450 kHz, 470 kHz)와 이동속도 (9 kts, 12 kts)에 따른 기포의 사·공간적 분포를 수중의 2차원 단면으로 나타내어 수중 기포군의 움직임을 확인하였다.

알고리즘의 검증을 위해 해상시험으로 얻어진 수신별 기포의 체적산란강도를 적용하여 산란신호를 모의하였고, 실측 산란신호와 비교하여 신호의 특성이 유사함을 확인하였다.

감사의 글

본 논문은 국방과학연구소의 『기포산란 항적과 난류 유동 항적의 음향 산란특성 연구 1』 과제의 연구 성과이며, 연구지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. R. D. Peltzer, W. D. Garrett, P. M. Smith, "A remote sensing study of a surface ship wake," *IEEE J. Oceans*, 17, 277-286, 1985.
2. M. V. Trevorrow, S. Vagle, D. M. Farmer, "Acoustical measurements of microbubbles within ship wakes," *J. Acoust. Soc. Am.*, 95, 1922-1930, 1994.
3. G. C. Gaunaurd, H. Huang, "Sound scattering by bubble clouds near the sea surface," *J. Acoust. Soc. Am.*, 107, 95-102, 2000.
4. R. J. Unick, *Principles of Underwater Sound*, (3rd ed., McGraw-Hill, New York, 1983).
5. P. C. Etter, *Underwater Acoustic Modeling*, (2nd ed., E & FN SPON, 1996).
6. 상낙진, 능동 표적신호 합성, 석사학위논문, 한국해양대학교, 1994.
7. W. S. Hodgkiss, Jr., "An Oceanic Reverberation Model," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. OE-9, 63-72, 1984.
8. F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter, H. S., "Computational Ocean Acoustics (AIP series in modern acoustics and signal processing)", (American Institute of Physics, New York, 1994).
9. F. H. Fisher, V. P. Simmons, "Sound absorption in sea water," *J. Acoust. Soc. Am.*, 62, 558-564, 1977.
10. J. C. Novanni, R. S. Keiffer, G. V. Norton, "A model for variations in the range and depth dependence of the sound speed and attenuation induced by bubble clouds under wind-driven sea surfaces," *IEEE J. Oceanic, Eng.*, 23, 423-438, 1998.
11. C. S. Clay, H. Medwin, *Acoustical Oceanography: Principles and Applications*, Wiley-Interscience, New York, 1977.
12. R. P. Chapman, J. H. Harris, "Surface backscattering strengths measured with explosive sources," *J. Acoust. Soc. Am.*, 34, 1592-1597, 1962.
13. J. K. E. Tunaley, E. H. Buller, K. H. Wu, M. T. Rey, "The Simulation of the SAR Image of a Ship Wake," *IEEE J. Trans. Geosci. Remote Sens.*, 29, 149-156, 1991.
14. 지윤희, 이재훈, 김재수, 김우식, 최상문, "항적에 의한 산란신호의 실험적 연구," 제7회 해양무기 학술발표대회 논문 초록집, pp.64, 2008.
15. 이재훈, 지윤희, 김재수, 김우식, 최상문, "항적내 미세기포의 시·공간적 분포," 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집, pp.2317-2318, 2008.
16. 지윤희, 이재훈, 김재수, 김우식, 최상문, "항적 산란 신호의 이론과 모델링," 한국음향학회 춘계학술 발표대회 논문집, pp. 191-192, 2008.

저자 약력

•지 윤 희 (Yoon-Hee Ji)



2007년 2월: 한국해양대학교 해양개발공학부 (공학사)
2007년 3월~현재: 한국해양대학교 해양개발공학과 (석사과정)
*주관심분야: 수중음향, 알고리즘 개발

•이 재 훈 (Jae-Hoon Lee)



2005년 2월: 한국해양대학교 해양개발공학부 (공학사)
2008년 2월: 한국해양대학교 해양개발공학과 (공학 석사)
2009년 1월~현재: 아이에스텍 (주) 수중음향부 연구원
*주관심분야: 수중음향신호처리

••김 재 수 (Jea-Soo Kim)



1981년 2월: 서울대학교 조선공학과 (공학사)
1984년 5월: 미국 University of Florida, 해양공학 (공학석사)
1989년 5월: 미국 MIT, 해양공학, 수중음향 (공학박사)
1990년~1991년: 국방과학연구소 산양연구원
1999년 8월~2001년 2월: 미국 Scripps 해양연구소 Visiting Scientist
1991년~현재: 한국해양대학교 해양개발공학부 교수

•김 정 해 (Jung-Hae Kim)



2005년 2월: 한국해양대학교 해양개발공학부 (공학사)
2007년 2월: 한국해양대학교 해양개발공학과 (공학 석사)
2007년 2월~현재: UIG넥스원 (주) 연구개발본부 Maritime연구센터 연구원
*주관심분야: 수중음향신호처리

•김 우 식 (Woo-Shik Kim)

한국음향학회지 제20권 제3호 참조
1991년 2월: 한국외국어대학교 물리학과 졸업 (공학사)
1993년 2월: 한국외국어대학교 물리학과 졸업 (이학석사)
2005년 2월: 한국해양대학교 해양개발공학과 졸업 (공학박사)
1993년 3월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
*주관심분야: 수중음향신호처리, 수중음향환경신호 모델링

•최 상 문 (Sang-Moon Choi)

한국음향학회지 제20권 제3호 참조
1983년 2월: 한양대학교 자원공학과 (공학사)
1985년 2월: 한양대학교 자원공학과 (공학석사)
1995년 5월: 미국 Texas A&M대학 지구물리학과 (이학박사)
1995년 6월~현재: 국방과학연구소 책임연구원
*주관심분야: 수중음향 신호처리, 수중음향환경신호 모델링