

공분산 행렬 해석기법을 이용한
모노펄스 소나 표적상태 추정 성능 향상 기법
An Enhanced Target State Estimation using
Covariance Analysis Techniques for a Monopulse Sonar System

이 창 호*, 김 재 수**, 이 상 영***, 김 강***, 오 원 천***, 조 운 현***
Chang Ho Lee*, Jea Soo Kim**, Sang Young Lee***, Kang Kim***,
Woun Chun Oh***, Woon Hyun Cho***

요 약

표적 상태추정은 소나 신호처리의 중요한 문제이다. 본 연구에서는 모노펄스 소나의 표적정보를 이용한 표적 상태추정에 공분산 해석기법을 적용하여 상태추정 성능을 향상시켰다. 앞서 개발된 MOST신호 합성기법으로 모의 표적신호를 발생시켜 신호대 잡음비의 변화에 따른 조건에서 제시된 기법의 성능을 평가하였다.

Abstract

Target state estimation is a fundamental problem of the sonar signal processing. In this paper, the covariance analysis techniques are applied to enhance the performance of the target state estimation of a monopulse sonar system. MOST, the artificial target signal generator based on the highlight model is used to generate signals in various target states. The performance of the developed method has been evaluated by applying it to the various S/N. The enhanced performance of the covariance analysis method presented in this paper is discussed.

I. 서 론

소나체계의 개발에서 소나의 성능은 표적 탐지 (target detection), 표적의 추적(target tracking), TMA(target motion analysis)등에 의해 표적의 특성을 정확히 파악하는 것에 좌우된다. 이러한 소나의 성능 향상을 위해 여러가지 알고리즘들이 개발되고 있으며, 많은 연구와 노력이 행해지고 있다[1][2].

본 논문에서는 모노펄스 소나의 성능향상을 위한 표적의 상태추정(target state estimation)기법을 제시하고자 한다. 표적 상태추정을 하기 위해 선행되어야 할 문제는 능동탐지 알고리즘(active detection algorithm) 및 표적산란 잔향신호의 주파수 및 시간 특성의 파악과 이러한 특성을 가진 표적신호를 발생시키는 것이다. 표적신호의 발생은 표적 반사강도(TS), 도플러, 펄스신장

(pulse elongation)이 고려되어 있으며 컴퓨터에서 적용이 편리한 단위표적(point target, HL(High Light))의 개념을 도입하고 있는 MOST(MOVing Spread Target signal simulation)신호발생기를 이용하였다[3]. 음원에서 발생된 신호는 수중환경을 통과하게 되는데 이 때 수신부에 들어오는 신호는 표적신호뿐만 아니라 복반사음, 자체소음, flow noise등 여러소음들이 합성되어서 들어온다. 본 논문에서의 문제를 단순화 하기 위해 소음을 복반사음이 고려되지 않은 백색잡음(White Noise)으로 모델링 하였다. 발생된 백색잡음은 신호대 잡음비에 따라 크기 조절을 하고 표적신호와 합성하여 센서 수신신호를 생성시켰다.

이렇게 발생된 센서 수신신호를 위상 및 진폭 모노펄스 기법을 적용하여 표적각도 및 반사신호 시간을 측정한다. 표적 상태추정 성능을 향상시키기 위해 공분산 해석기법(Covariance analysis technique)을 이용하여 모노펄스 소나의 측정치로 표적 상태추정을 하였다. 서론에 이어 II장에서는 표적신호 발생기법을 III장에서는 위상 및 진폭모노펄스 이론에 대해 언급하고 IV장에서 공

*LG 정밀 연구소

**한국해양대학교

***국방과학연구소

접수일자: 1995년 10월 30일

분산 해석기법에 의한 표적 상태추정기법 및 시뮬레이션 결과들을 비교 분석 하였다.

II. 표적신호의 발생

2.1 표적신호의 발생

표적신호의 발생은 개발된 MOST를 이용하였다. MOST는 공간상의 물체가 무한소인 점으로 반사체가 될 수 없지만 인위적으로 표적강도를 두어 반사체로 간주하는 단위표적을 도입하고 있으며, 이렇게 가정된 하나의 단위표적에 의해 반사되어 오는 신호는 송신신호와 크기만 다를 뿐 모양은 동일하다. 그리고 단위표적이 움직이는 결과로서 나타나는 도플러와 함께 신호의 축소 또는 신장되는 현상이 포함되어 있다. 큰 표적에 대해서는 여러개의 단위표적들로 이루어 졌다고 가정할 수 있는데 단위표적이 N개 존재할 경우의 표적신호는 다음과 같다.

$$s_i(t) = \sum_{n=1}^N \{x(t) \cdot A_{HL,n} \cdot e^{j2\pi f_{di} t}\} \otimes \delta(t-t_{ni}) \quad (1)$$

여기서 $s_i(t)$ 는 i 번 째 센서의 수신신호, $x(t)$ 는 송신신호, $A_{HL,n}$ 는 단위표적의 강도, f_{di} 는 도플러주파수, t_{ni} 는 i 번 째 센서의 n 번째 단위 표적의 신호도착시간, \otimes 는 콘볼루션을 의미한다.

2.2 배경소음의 발생

배경소음은 문제를 단순화 하기 위해 백색잡음으로 가정하였으며 신호대 잡음비는 대역통과된 소나 신호처리가 입력단의 신호대 잡음비로 정의된다. 즉,

$$S/N = 10 \log \frac{\sigma_{sw}^2}{\sigma_{nw}^2} \quad (2)$$

여기서 σ_{sw} σ_{nw} 는 대역 통과된 신호와 잡음의 전력이다. 신호 전력은 표적반사 신호가 존재하는 시간영역에서의 평균전력으로서

$$\sigma_{sw}^2 = \frac{1}{t_e - t_s} \int_{t_s}^{t_e} s^2(t) dt \quad (3)$$

여기서 t_s 는 표적신호가 시작되는 시간, t_e 는 표적신호의 마침 시간이다. 대역통과된 소음을 발생시키기 위해 아래 특성을 갖는 대역통과 필터를 통과시켰다.

$$|H(f)|^2 = \frac{\sigma_{nw}^2}{\text{대역폭}} \quad (4)$$

이렇게 발생한 소음을 신호와 합성하여 수신신호를 발생시켰다.

III. 위상 및 진폭 모노펄스 이론

3.1 위상 모노펄스

위상 모노펄스방법은 각 센서에 들어오는 신호의 중심주파수의 위상을 비교하여 신호가 들어오는 각도를 추정하는 방법이다[4][5]. 그림 1에서 수신기에 들어오는 신호가 θ 의 각도로 들어올 때 센서 X와 Y의 중심주파수의 위상차는 상호 스펙트럼 $S_{xy} = E[X(f)Y^*(f)]$ 의 위상으로 주어진다. 주파수 영역에서 센서 X와 Y사이의 중심주파수의 값을 각각 $X(f)$, $Y(f)$ 라고 하면

$$\begin{aligned} X(f) Y^*(f) &= (R_x + jI_x)(R_y - jI_y) \\ &= (R_x R_y + I_x I_y) + j(I_x R_y - R_x I_y) \end{aligned} \quad (5)$$

이므로 센서에 들어오는 중심주파수의 위상차는

$\varphi_x - \varphi_y = \tan^{-1} \left(\frac{I_x R_y - R_x I_y}{R_x R_y + I_x I_y} \right)$ 이다. 그러므로 그림 1에서 신호가 들어오는 각도는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} d \sin \theta &= \frac{\lambda}{2\pi} (\varphi_x - \varphi_y) \\ \therefore \theta &= \sin^{-1} \left[\frac{1}{2\pi} \frac{\lambda}{d} (\varphi_x - \varphi_y) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 λ 는 중심주파수의 파장이고 d 는 센서간의 간격으로 $\lambda/2$ 으로 하였다.

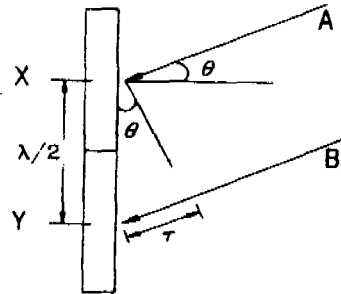


그림. 1. 신호대 잡음비에 따른 각도 추정

3.2 진폭 모노펄스

진폭 모노펄스는 여러개의 수평 및 수직 센서를 이용하여 수신빔을 형성한 다음 수신빔의 진폭비로서 입사하는 신호의 각도를 알아내는 방법이다[4][5]. 수신빔의 형성은 각 센서에 시간지연을 줌으로서 발생시킬수가 있는데 θ_p , θ_n 로 빔을 형성할 경우 각 센서의 지연시간(τ_i)은

$$\begin{aligned} \tau_{ip} &= \frac{d(N-i) \sin \theta_p}{c} \\ \tau_{in} &= \frac{d(N-i) \sin \theta_n}{c} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 i 는 센서번호, N 은 센서갯수, d 는 센서간격, c 는 음속(1500m/s)이다. 빔폭은 사용주파수와 배열의 크기

($L=(N-1) \times d$), 각 센서의 가중치(weighting, w)로 주어지는데 센서의 가중치가 같을 경우 빔폭은 $2\lambda/L$ 이다. 각 센서의 수신신호(r_{ip}, r_{in}, w)는 빔형성각도에 따른 지연시간(τ_{ip}, τ_{in})과의 콘볼루션으로 이루어진다.

$$\begin{aligned} r_{ip}(t) &= r_i(t) \otimes \delta(t - \tau_{ip}) \\ r_{in}(t) &= r_i(t) \otimes \delta(t - \tau_{in}) \end{aligned} \quad (8)$$

각 수신빔의 형성에 따른 진폭값은

$$\begin{aligned} A_p &= \frac{1}{s} \sum_{i=1}^N w_i \left[\frac{1}{t} \int_0^t r_{ip}(t) dt \right] \\ A_n &= \frac{1}{s} \sum_{i=1}^N w_i \left[\frac{1}{t} \int_0^t r_{in}(t) dt \right] \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 w_i 는 각센서의 가중치이고 s 는 $\sum_{i=1}^N w_i$ 이다. 이 때 신호의 입사각도는 각 수신빔 형성에 따른 진폭값(A_p, A_n)의 비율로서 구해진다.

3.3 표적상태의 예

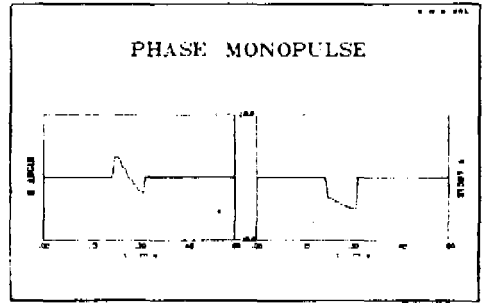
음원에서 발생되는 파는 표 1과 같고 표적의 위치는 음원에 대하여 x방향에 대하여 200m, z방향에 대하여 15m 차이가 있다. 표적의 각도는 z축에 대하여 반시계방향으로 20° 회전시킨 후 y축에 대하여 반시계방향으로 10° 회전을 시켰다. 표적의 길이는 60m이고 난위표적은 직선으로 배열하였다.

표 1. 표적상태의 예

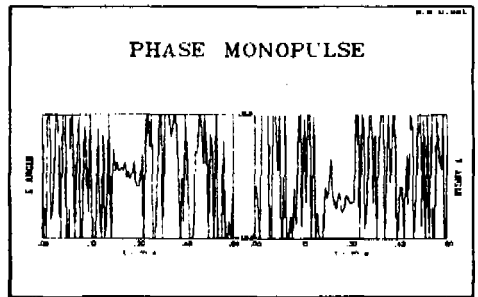
송신호 형태			CW
송신신호 길이			10ms
음원	자세각	z, y, x	0°, 0°, 0°
	위치	x, y, x	100m, 0m, 100m
표적	자세각	z, y, x	-20°, -10°, 0°
	위치	x, y, z	300m, 0m, 115m

3.4 모노펄스 방법에 의한 각도추정

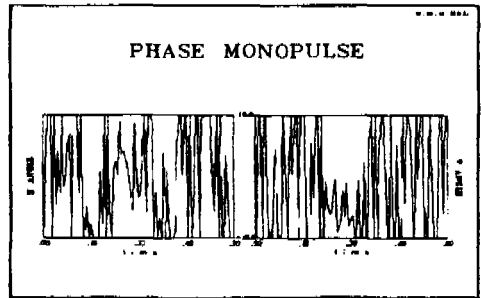
모노펄스 방법을 이용한 각도추정에서 수신신호는 기존의 MOST를 이용하였다. 위상 모노펄스 일 경우 수평·수직 각 2개의 센서, 진폭 모노펄스 일 경우 수평·수직 각 7개의 센서에 수신신호를 발생시켰으며 소음이 없는 경우와 신호대 잡음비가 10dB, 5dB일 경우에 대하여 각각 각도추정을 해 보았다. 모노펄스 방법에 의한 각도 추정에서 위상모노펄스 방법에서는 특정주파수의 위상을, 진폭모노펄스에서는 진폭을 비교하므로 그림2에서 표적 신호가 존재하지 않는 부분에서는 불규칙성이 나타나고 표적신호가 존재하는 부분에서는 신호대 잡음비에 따라 표적각도의 기복이 키짐을 알 수 있다.



S/N = ∞

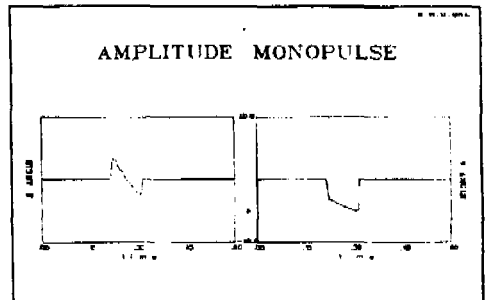


S/N = 10 dB

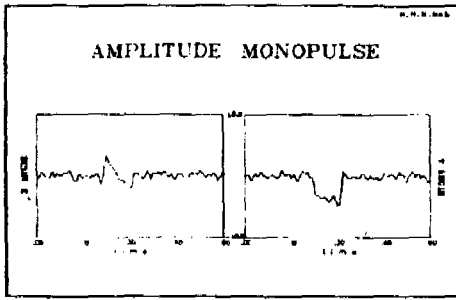


S/N = 5 dB

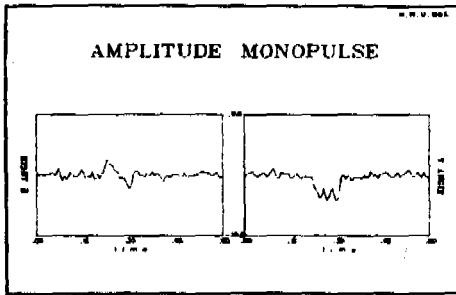
a) 위상 모노펄스



S/N = ∞



S/N = 10 dB



S/N = 5 dB

b) 진폭 모노펄스

그림 2. Coordinate system

IV. 표적상태추정

4.1 표적상태추정 기법

표적신호가 존재하는 동안 구하여진 값들을 공분산 해석기법을 이용하여 표적의 상태추정을 하였다. 모노펄스 방법에 의해 구하여진 값은 시간, 수평각도, 수직각도이며 수평 및 수직각도는 그림 3에서 $\angle POQ$ 와 $\angle POR$ 이다.

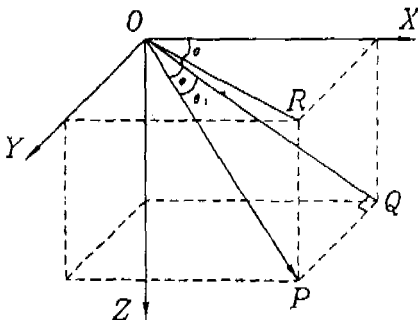


그림 3. Coordinate system

직교좌표계로 바꾸어 주면

$$\begin{aligned} x_i &= \ell_i \cos \varphi_i \cos \theta_i \\ y_i &= \ell_i \cos \varphi_i \sin \theta_i \\ z_i &= \ell_i \sin \varphi_i \end{aligned} \tag{10}$$

여기서 $\ell_i = \frac{c \cdot t_i}{2}$

$$\theta_i = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta_{1i}}{\cos \varphi_i} \right)$$

$\{r_i\}$ 를 (x_i, y_i, z_i) 의 행벡터(column vector)라고 하고, 임의로 잡은 벡터 $\{v_i\}$ 를 (v_1, v_2, v_3) 의 행벡터라고 하자. 두 벡터사이의 각도를 ϕ_i 라고 하고 ϵ_i 는 내적으로서 r_i 의 전치행렬과 v_i 의 행벡터의 곱으로 표현된다.

$$\epsilon_i = \cos \phi_i = \{r_i\}^t \{v\} \tag{11}$$

여기서 t 는 transpose이다.

$$S = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \epsilon_i^2 \text{ 이라면}$$

S 는 $\{v\}^t [C_m] \{v\}$ 이다. M 은 구하여진 데이터의 갯수이며, $[C_m]$ 은 공분산 행렬로서 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} C_m &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \{r_i\} \{r_i\}^t \\ &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} [x_i \ y_i \ z_i] \\ &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \begin{bmatrix} x_i^2 & x_i y_i & x_i z_i \\ y_i x_i & y_i^2 & y_i z_i \\ z_i x_i & z_i y_i & z_i^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{12}$$

벡터 성분의 평균값을 (m_x, m_y, m_z) 라고 했을 때 공분산 행렬의 요소 값은 $x_i = (x_i - m_x)$, $y_i = (y_i - m_y)$, $z_i = (z_i - m_z)$ 으로 표현되며 평균값은

$$\begin{aligned} m_x &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \\ m_y &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \\ m_z &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i \end{aligned} \tag{13}$$

이다.

이 때 S 의 최소값을 구하기 위해 $v \cdot v = 1$ 이라는 제한 요소를 이용한 Lagrange Multiplier 방법을 이용하였다.

$$\begin{aligned} F &= S - \lambda x \\ &= \{v\}^t [C_m] \{v\} - \lambda \{v\}^t \{v\} \end{aligned} \tag{14}$$

여기서 λ 는 Lagrange Multiplier이며 α 는 $v \cdot v$ 이다.

최소자승 오차(Least Square Error)를 구하기 위해 F 의 편미분을 취한값이 0 이어야 한다.

$$\nabla_v(F) = \nabla_v(v)'[C_m]\{v\} - \lambda\{v\}'\{v\} = 0$$

$$[C_m]\{v\} = \lambda\{v\} \quad (15)$$

여기서 λ 와 v 는 $[C_m]$ 의 고유값, 고유벡터이다. 이 때 세 개의 고유값과 서로 직교하는 고유벡터가 구해지는데 가장 큰 고유값은 표적의 크기를 나타내고 그 고유벡터는 표적의 주방향 성분을 나타낸다[6].

4.2 표적의 정열도(γ)

표적의 정열도는 공분산 행렬의 고유값로서 표현될 수 있다. 구하여진 고유값이 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 라고 하면 정열도는 다음과 같이 표현된다[6].

$$\gamma^2 = \frac{3(\text{tr}[C_m]^2) - (\text{tr}[C_m])^2}{2(\text{tr}[C_m])^2}$$

$$= \frac{(1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1})^2 + (1 - \frac{\lambda_3}{\lambda_1})^2 + (1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1} - \frac{\lambda_3}{\lambda_1})^2}{2(1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} - \frac{\lambda_3}{\lambda_1})^2} \quad (16)$$

$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ 이고 tr 은 행렬의 주대각 성분의 합으로서 고유값의 합으로 표현된다. 정열도 γ 값이 1에 근접할 수록 데이터 값이 직선형태로 놓여 있는 상태를 표현하고 0에 근접할수록 데이터 값이 산개해 있음을 표현한다. 결과값에서도 소음이 없는 상태에서는 정열도는 1에 근접하고 소음이 커질수록 정열도는 작아진다.

4.3 표적상태 추정값

표적의 길이가 60m이고 음원에 비해 x방향으로 200m, z방향으로 15m떨어져 있고 z축에 대하여 -20° 회전시킨 다음 y축에 대하여 -10° 회전시켰을 경우 위상 모노필스와 진폭 모노필스방법에 의한 표적상태 추정값들을 표 2, 표 3, 표 4에 나타내었다.

표 2. 위상 모노필스의 경우 표적상태 추정값(1 ping에 대한 값)

		SNR ∞	SNR 10dB	SNR 5dB
중심 위치	x	201.2	201.3	199.9
	y	-2.0	1.8	4.9
	z	15.7	13.0	20.4
수평각도		-19.8	-3.8	-42.2
수직각도		-9.9	-15.0	-18.8
표적크기(m)		59.9	57.7	67.7
정열도(γ)		0.99	0.50	0.17

표 3. 위상 모노필스의 경우 표적상태 추정값(10 ping에 대한 평균값)

		SNR ∞	SNR 10dB	SNR 5dB
중심 위치	x	201.2	201.1	201.2
	y	-2.0	0.2	-2.0
	z	15.7	15.3	15.4
수평각도		-19.8	-19.4	-23.5
수직각도		-9.9	-7.6	-9.5
표적크기(m)		59.9	59.6	61.1
정열도(γ)		0.99	0.97	0.94

표 4. 진폭 모노필스의 경우 표적상태 추정값

		SNR ∞	SNR 10dB	SNR 5dB
중심 위치	x	200.8	201.0	201.1
	y	-0.7	-0.8	-0.4
	z	15.2	13.6	11.6
수평각도		-19.8	-17.4	-16.9
수직각도		-9.8	-8.1	-6.3
표적크기(m)		60.6	59.6	59.4
정열도(γ)		0.99	0.97	0.94

단일 ping에 대하여 소음이 존재하지 않는 순수한 표적신호의 경우, 위상 및 진폭 모노필스방법에 의한 표적의 상태추정값은 표적의 정보와 근사하지만 소음이 존재할 경우 위상 모노필스의 오차의 정도가 진폭모노필스에 비해 크다. 특히 수평 및 수직각도, 정열도에 있어서는 표적의 정보와 상당히 큰 오차가 있었다. 이 경우 여러개의 ping을 합하여 평균을 취한 결과 표적의 정보와 근사한 표적상태추정을 하는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 MOST신호 합성기로 발생시킨 표적신호에 모노필스 방법을 적용하여 표적신호가 존재하는 구간에서 입사신호의 수평 및 수직 각도를 구하였으며, 이 값들을 이용하여 공분산 행렬을 결정하고 공분산 행렬에 관계되는 고유값 문제를 풀어서 표적의 상태추정을 하였다.

표적의 상태추정값은 소음이 존재하지 않을 경우는 표 1에 주어진 표적의 상태와 일치함을 보였으나 신호대 잡음비의 증가에 따라 그 오차가 커짐을 알 수 있다.

본 연구에서는 공분산 행렬 해석기법을 이용하여 표적의 상태추정 가능성을 알아보았으며, 개발된 표적상태추정 알고리즘은 수조 및 해상 실험을 통하여 획득한 실제 데이터를 통하여 검증 보완 되어야 한다.

참 고 문 헌

1. R. S. Baheti, "Efficient Approximation of Kalman Filter

for Target Tracking", IEEE Trans. Aerosp. Electro. Syst. vol. AES-22 No. 1, Jan. 1986.

2. Bar-Shalom, Y., "Tracking methods in a mul- titarget environment", IEEE Trans. on Automatic control, AC-23 pp. 618-626, Aug. 1978
3. 성낙진, 김재수, 이상영, 김강, "능동표적신호 합성", Acoustical Society of Korea, Vol. 13 No. 2, pp. 30-37, 1994
4. Samuel, M. Sherman, Monopulse principles and techniques, Artech House Inc, 1985
5. A. I. Leonov, K. I. Formichev, Monopulse radar, Artech House Inc, 1986
6. A Benhama, C Cllet, M Dubesset, "Study and appli- cation of spatial directional filtering in three-component recordings", Geophysical Prosepcting 36, pp. 591-613, 1988
7. R. J. Urick, Principles of underwater sound, McGraw-hill Book Company, New york 3rd ed, 1983

▲이 창 호 1969년 1월 5일생
 1993년 2월 : 한국해양대학교 해양공학과 공학사
 1995년 2월 : 한국해양대학교 대학원 해양공학과 공학석사
 1995년 4월~현재 : LG정밀 연구소 연구원

▲오 원 천 1956년 9월 7일생
 1980년 2월 : 고려대학교 전자공학과 공학사
 1982년 2월 : 고려대학교 전자공학과 공학석사
 1992년 5월 : The University of Texas at Austin(박사)
 Dept. Electrical and Computer Eng.
 1982년~현재 국방과학연구소 선임연구원

▲김 재 수 : 제 13권 2호 참조

▲이 상 영 : 제 13권 2호 참조

▲김 강 : 제 13권 2호 참조

▲조 운 현 : 제 13권 2E호 참조