

PSK 변조방식이 수중통신에 미치는 영향에 관한 연구

Effects of PSK Modulation Methods in Underwater Acoustic Communication

조진수*, 정승백*, 심태보*

(Jin-Soo Cho*, Seung-Back Jung* Taebo Shim*)

*숭실대학교

(접수일자: 2007년 8월 19일; 수정일자: 2007년 9월 20일; 채택일자: 2007년 10월 5일)

수중에서 무선통신이 기존에는 초음파를 이용한 단거리통신에 국한되었으나 최근 고주파를 이용한 장거리 통신의 필요성이 증가되고 음성뿐만 아니라 각종 데이터나 고화질 영상자료의 송수신 수요가 늘어나고 있다. 본 연구에서는 수중에서 디지털 변조방식의 차이에 따라 실제 수중통신에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 모의 환경 하에서 PSK기반의 변조방식 (BPSK, QPSK, MSK, GMSK)에 대한 시뮬레이션을 통해 실험한 결과 GMSK만이 큰 차이를 보였다. 위 결과들 바탕으로 SNR을 35dB이하로 하고 부산 남방에 위치한 207-선 (한국해양자료센터)의 15Km 구간을 모의하여 음성통신과 영상자료를 전송실험한 결과 음성통신시 (10^{-2} BER, 채널용량 1Kbps 기준)는 약 8Km의 거리 차이, 그리고 영상자료 (3×10^5 화소, 화소 당 정보량 4bit) 전송시는 BPSK, QPSK, MSK 는 60Kbps, GMSK는 45Kbps의 전송율을 확보하여 약 7초의 전송시간 차이가 생김을 확인하였다.

핵심용어: 수중통신, 디지털 변조, 페이딩, 다중경로, 비트오류율

투고분야: 수중음향 분야 (5,6)

In underwater wireless communication, needs for long distance communication using the high frequency are surpassing ones of short range communication by ultrasonic wave, and demands for transmitting and receiving various data such as voice or high resolution image data are increasing as well. In this work, we studied the effects on the real underwater communication depending on the difference of digital modulation methods. Simulation shows that only the performance of GMSK among many other PSK based modulation schemes (BPSK, QPSK, MSK, GMSK) is significant. Test condition simulates the oceanographic conditions along the 207- survey line, 15Km south of Busan and SNR is maintained 35dB or below. Simulated tests are composed of both transmitting image data (3×10^5 pixel, 4 bit per pixel), and voice communication (10^{-2} BER, channel capacity of 1Kbps). Test results show that there are gain of about 7 seconds in transmission time in image transmission case, where channel capacity for BPSK, QPSK, and MSK and for GMSK were 65 Kbps and 45 Kbps, respectively, and gain of about 8Km in distances in voice communication case.

Key words: Underwater acoustic communication, Digital modulation, Fading, Multipath, Bit Error Rate

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5,6)

I. 서론

수중통신 시스템을 통하여 전달되는 자료의 형태는 명령, 제어, 음성, 그리고 영상자료 등으로 구분할 수 있다. 이러한 자료 전송의 궁극적인 목적은 가능한 빨리 그리고 높은 신뢰도로 보내는 것이다. 음성통신의 경우에는 특정 파다

미터를 전송하는 다양한 보이스 디코딩 (Voice Decoding) 방법에 의하여 1Kbps 이하의 전송율과 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 의 낮은 BER (Bit Error Rate)에서도 가능하나 [1] 수중센서의 의해 수집되는 자료전송의

경우에는 수십 Kbps와 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 의 상대적으로 높은 BER을 요구한다. 그러나 다중반사가 많은 천해환경에서는 오류 없이 정보를 전송하기는 어려우므로 FSK (Frequency Shift Keying) 변조방식과 같이 송/수신기간 전송 신호의 위상일치가 필요 없는 비동기방식 (Noncoherent)을 주로

책임저자: 심태보 (tbshim@ssu.ac.kr)
156-746 서울시 동작구 상도5동 숭실대학교 형남공학관 050525호
수중음향통신연구실
(전화: 02-825-0918)

사용하였으나 잔향시간에 비례하는 휴지시간 (Guard Time)에 의해 전송속도가 낮고, MFSK (Multiple Frequency Shift Keying)는 대역효율이 낮아 PSK (Phase Shift Keying) 등의 동기방식 (Coherent)이 요구되었다 [2].

이미 미국의 Woods Hole 해양연구소에서는 PSK 전송방식 등의 동기방식에 대한 실험을 성공하였다 [3]. 그 후 대역폭 효율을 높일 수 있는 동기방식에 대한 연구가 집중되어 일본의 Michiya Suzuki 등은 1992년 모선과 잠항체간 수중영상 전송을 위해 비동기방식과 동기방식을 모두 갖는 4-DPSK (Differential PSK) 변조 기법으로 20kHz 대역에서 16kbps의 전송율을 얻어 6.5Km 거리에서 256 x 240 화소의 영상을 8초 만에 전송을 성공하였다 [4]. 또한 M. Stojanovic 등은 QPSK를 이용하여 90Km의 거리에서 1Kbps의 전송율을 구현하였다 [5], [6]. 상기 연구에서처럼 높은 전송효율을 얻기 위해 여러 가지 변조방식을 사용하였으나, 직접적인 변조방식에 대한 효율 비교는 하지 않았다.

우리나라의 경우에는 박 등에 의해 변조방식 (FSK, BPSK, DPSK)에 따른 BER을 검토한 예 [7]가 있으나, 해양환경 조건을 고정한 상태에서의 검토였다.

본 연구에서는 수온의 변화, 경사면 기울기의 변화, 송신 주파수를 변화시켜 PSK 기반의 변조방식에 대한 효율성을 분석하였다. PSK 변조는 BPSK (Binary PSK)에 비해 주파수 효율성이 높은 QPSK (Quadrature PSK)와 QPSK의 주파수 공유 대역폭과 같은 몇 가지 문제점을 해결하기 위한 MSK (Minimum Shift Keying), GMSK (Gaussian MSK)로 비교 실험하였다. 또한 실험결과로 도출된 BER의 분석을 통해 S/N의 범위를 분석하고, 수중에서 채널용량과 BER의 조율로 실제 통신 시 변조방법이 미치는 영향을 산출하였다.

본 논문은 총 4장으로 구성되어있고 2장에서는 수중음파 전달 관련 이론을 3장에서는 실험내용 및 결과를, 마지막 4장에서는 결론을 논하였다.

II. 이론

수중통신은 음파의 산란, 배경잡음, 도플러현상, 음파의 경계면 반사로 인한 다중경로 (Multi-path)등 열악한 환경조건에서 이루어진다. 특히 천해 환경에서는 다중경로 전달로 인한 시간 축 퍼짐 (Time spreading) 현상과 도플러 퍼짐 (Doppler spreading)현상으로 수신신호는 때때로 증강되거나 약해지는데 이 현상이 다중경로 페이딩이며,

디지털 무선신호가 전송될 때 수신신호의 오류율을 증가시킨다.

2.1. 수중 다중경로 레일리 페이딩

송신 주파수 $f_c(Hz)$ 의 연속파가 송신단에서 전송되었을 때 입사각 θ_n (n 은 여러개의 수신파를 의미)을 갖는 지면파는 식 (1)과 같다.

$$r_n(t) = Re [e_n(t) \exp(j2\pi f_c t)] \quad (1)$$

식 (1)에서 $e_n(t)$ 는 전송경로 길이 $L_n(m)$, 이동속도 $v(m/s)$, 파장 $\lambda(m)$, 입사파의 포락선 R_n 과 위상 θ_n 의 함수로 식 (2)와 같이 표현된다.

$$e_n(t) = R_n(t) \exp(j \frac{2\pi(L_n - vt \cos \theta_n)}{\lambda} + \phi_n) = x_n(t) + jy_n(t) \quad (2)$$

식 (2)에서 $x_n(t)$, $y_n(t)$ 는 각각 $e_n(t)$ 의 동상 성분(Ich)과 이상 성분(Qch)을 나타내며, 입사파의 도플러 효과는 $v \cos \theta_n / \lambda (Hz)$ 가 된다.

$x_n(t)$ 과 $y_n(t)$ 은 독립변수로 가우스 확률밀도를 가지며, 결합 확률 밀도는 레일리 확률밀도를 이루므로 조합 확률 밀도 $p(x, y)$ 는 식 (3)과 같다.

$$p(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}) \quad (3)$$

여기서 σ^2 는 분산이다.

변수 x , y 를 R_n (입사파의 포락선)과 θ_n (입사파의 위상)으로 다시 정리하면 포락선 변동은 레일리분포를 따르고 위상 변동은 균등 분포를 갖게 된다. 또한 수신 입사파의 입사각은 균일하게 분포되고 입사파의 수를 N 이라 하면 등가적인 저역통과 시스템의 복소수 페이딩 변동은 식 (4)와 같다 [8].

$$r(t) = x(t) + jy(t) = \left[\sqrt{\frac{2}{N_1+1}} \sum_{n=1}^{N_1} \sin\left(\frac{\pi n}{N_1}\right) \cos 2\pi f_c t \cos\left(\frac{2\pi n}{N_1}\right) t + \sqrt{\frac{1}{N_1+1}} (\cos 2\pi f_c t) \right] + j \left[\sqrt{\frac{2}{N_1+1}} \sum_{n=1}^{N_1} \sin\left(\frac{\pi n}{N_1}\right) \cos 2\pi f_c t \cos\left(\frac{2\pi n}{N_1}\right) t \right] \quad (4)$$

여기서 $N_1 = \frac{1}{2}(N-1)$ 이다.

식 (4)에 의해 송신기에서 형성된 복소수 변조신호가 입력되고 동등한 저역통과 시스템으로 표현함으로써 출력신호를 얻을 수 있다.

다중경로 전송환경에서 수신기는 직접파와 직접파보다 늦게 들어오는 지연파를 수신하게 되는데 상대적인 지연시간과 신호레벨 값을 이용한 레일리 페이딩 채널의 흐름도는 그림 [1]과 같이 표현된다. 입력변수인 음파의 상대적인 지연시간과 신호레벨은 Ray-Tracing 이론을 적용하여 산출하였으며 신호레벨의 계산은 수신되는 Ray간 전달손실(TL)의 차로 계산하였다.

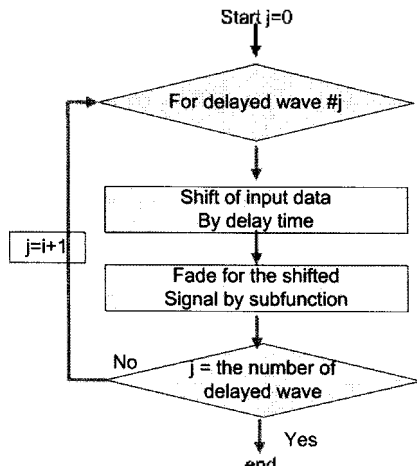


그림 1. 레일리 페이딩 채널 흐름도
Fig. 1. Diagram of Rayleigh fading channel.

각 Ray의 전달손실은 확산에 의한 손실, 해수면과 해저면에 의한 손실로 산출하였고 [9] 확산에 의한 손실은 식 (5)로 정의할 수 있다.

$$TL = 10 \log \frac{I(r)}{I_0} = 20 \log r + \alpha_a r 10^{-3} \quad (5)$$

여기서 I_0 는 음원으로 부터 1m 거리에서의 Intensity이며, $I(r)$ 은 거리 r 에서의 Intensity 이다. 또한 α_a 는 흡수 계수 이며 식 (6)과 같다.

$$\alpha_a = 3.3 \times 10^{-3} + \frac{0.11 f^2}{1 + f^2} + \frac{44 f^2}{4100 + f^2} + 3.0 \times 10^{-4} f^2 \quad (6)$$

또한 해수면의 산란손실 (α_s)은 식 (7)과 같다.

$$\alpha_s = -10 \log [1 - 0.0234 (fH)^{\frac{3}{2}}] \quad (7)$$

여기서 f 는 신호 주파수 [kHz], H 는 평균 파고 [ft] 이다. 해저면에서의 산란손실 (α_b)은 서로 다른 매질의 임피던스를 Z_1, Z_2 라 할 때 반사계수 R 은 식 (8)과 같이 표현된다.

$$R = \frac{Z_2 / Z_1 \sin \theta_1 - \sin \theta_2}{Z_2 / Z_1 \sin \theta_1 + \sin \theta_2} \quad (8)$$

여기서 θ_1 는 입사각, θ_2 는 투과 각이다.

해저면에서의 산란손실 (α_b)은 $\alpha_b = -20 \log_{10} |R|$ 같이 정의할 수 있다.

2.2. PSK 기반의 변조방식

위상편이변조 (PSK)는 2진 디지털 부호에 따라 반송파의 위상이 두 가지 상태로 천이되도록 하는 변조방법이다. 즉 디지털 부호가 0일 때 반송파의 위상을 θ_0 으로 하고, 1일 때 θ_1 으로 하면 그림 (2)와 같이 표현할 수 있다 [10].

PSK 기반의 변조방식은 여러 가지가 있으나 본 논문에서는 BPSK, QPSK, GMSK, MSK 방식에 대한 실험만을 하였다.

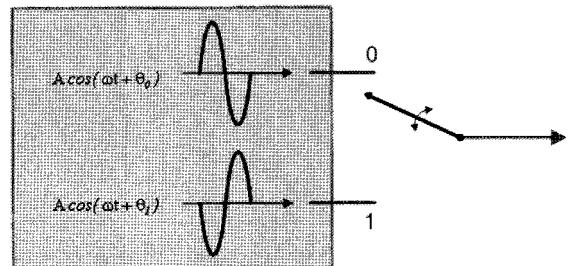


그림 2. PSK 신호발생
Fig. 2. PSK signal generation.

BPSK는 그림 (2)에서 위상관계가 $\theta_1, \theta_0 = 180^\circ$ 로 하는 방식이며 전송방식은 그림 (3)에서처럼 송신기에서 디지털 데이터가 펄스쉐이핑 필터 회로로 입력된 후 D/A 변환기를 통해 아날로그 신호로 변환되고 반송 신호파를 곱하여 전송

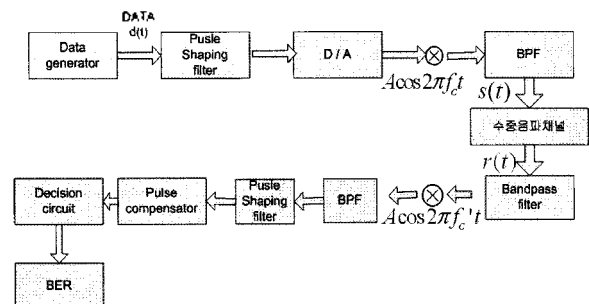


그림 3. BER 성능계산을 위한 BPSK 수중 전송 모델
Fig. 3. BPSK underwater transmitting model for BER calculation.

되며, 수신기에서는 수신된 신호를 송신기와는 반대로 A/D 변환기에 의해 디지털 샘플 데이터로 변환되어 복원 된다.

그림 (3)은 BER 성능계산을 위한 BPSK 수중 전송 시스템이다.

그림 (3)에서 수중음파 채널을 통해 수신된 신호는 디지털 신호로 변화되고 필터링 된 후 동기화 지점이 선택된다. 이 지점에서 신호레벨을 기준으로 1과 0으로 구분된다.

또한 BPSK 단일경로 페이딩의 이론적인 BER은 식 (9)과 같으며, 잡음대 신호의 에너지 비에 의해 BER이 결정된다.

$$BER_{BPSK} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{E_b/N_0}}} \right] \quad (9)$$

여기서 E_b 는 비트당 에너지이며, N_0 는 잡음 밀도로 1비트 당 전송되는 과정에서 부과되는 잡음 전력이며, $N_0 = \frac{\text{심볼당 잡음파워}}{\text{심볼 레이트}} (W/Hz)$ 로 표현된다.

QPSK는 두 개의 BPSK로 생성되며 두 신호를 구분하기 위해서 두 직교 반송신호가 사용되는데 $\cos 2\pi f_c t$ 와 $\sin 2\pi f_c t$ 이다. 두 반송신호는 한주기 (T_c) 영역에서 직교하며 식 (9)와 같다.

$$\int_0^{T_c} \cos 2\pi f_c t \times \sin 2\pi f_c t = 0 \quad (10)$$

MSK는 QPSK의 급격한 위상변화를 연속적으로 변화시키는 방식으로 비선형 증폭기로 인한 부호간 간섭을 피할 수 있다. GMSK는 MSK의 확장된 형태로 회로의 구성은 같으나 입력 데이터가 가우시안 필터로 필터링 되어 형태가 안정화 된다.

III. 모의실험

3.1. PSK 기반의 변조방식별 BER 실험

모의실험은 천해 (수심 100m) 환경을 모사하였고, 송신기 및 수신기가 1km 이격하여 동일 수심 (40M)에 있으며 구간 내에서 등 음속 (1510m/sec) 가정 하에 고유음선 (Eigen ray)의 BER을 산출하였다. 기타, 평균파고는 1ft, 해저면 재질은 모래로 하여 Z_s/Z_b 의 값은 2.4로, 주파수는 2000Hz로 고정하였다.

표 1. 등속구간에서의 고유음선 입력치

Table 1. Input values for eigen rays in the iso-velocity case.

No	전송거리 (m)	전송시간 (sec)	전달손실 (dB)	UP bounce	DOWN bounce
1	1020	0.67999	8.4547	1	1
2	1007	0.6714	7.8418	0	1
3	1000	0.66666	0.000075384	0	0
4	1003.4	0.66891	0.44595	1	0
5	1020	0.67999	8.4745	1	1

그림 (4)는 모의된 환경에서의 고유음선의 분포이며, 5개의 고유음선에 관한 입력치는 표 (1)과 같다.

표 (1)에서 세 번째 (No.3)의 고유 음선만이 해표면 반사나 해저면 반사 없이 수신되어 가장 먼저 수신되었으며 손실도 가장 적다. 이 음선을 기준으로 나머지 음선들의 도달 시간차와 전달손실의 차를 산출하여 PSK기반의 변조방식에 대한 BER을 계산하였다.

수중통신 시 통신 매체에 따라 요구되는 BER이 다르며, 일반적으로 음성에서는 10^{-2} 과 10^{-3} 사이, 데이터 전송에서는 10^{-5} 과 10^{-6} 사이의 BER이 요구되지만 데이터의 손실이 많은 수중 특성을 고려하여, SNR을 35dB 이하로 그리고 BER을 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 로 고정하였을 때 변조방식별 실제 수중통신의 영향을 분석하였다.

그림 (6)은 등 음속 구간에서 위에 언급한 조건하에 변조방식별 BER을 계산한 실험치이다.

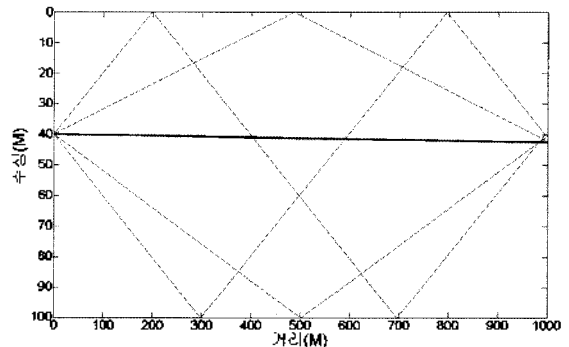


그림 4. 등속구간에서의 고유음선(Eigen Ray)

Fig. 4. Eigen rays in the iso-velocity.

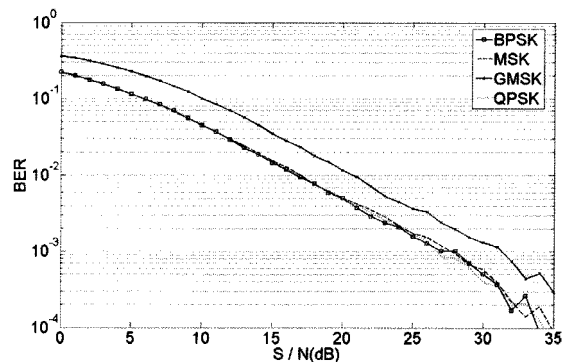


그림 5. 등속구간에서의 변조방식별 BER

Fig. 5. BER according to modulation methods in the iso-velocity area.

실험결과에서 BER이 10^{-2} 인 경우 SNR은 BPSK, QPSK, MSK가 거의 동일하게 약 15dB 정도이며, GMSK는 약 20dB로 가장 낮게 나타난다. 또한 BER이 10^{-3} 인 경우에도 각각 25dB와 30dB로 5dB정도의 차이를 보이고 있다.

상기 모의 실험은 음속이 등속이며, 해저면이 수평을 이루고, 주파수는 2000Hz를 사용한다는 가정하에서 실행되었으므로, 수중환경에 대한 변화를 알아보기 위하여 음속, 해저지형 그리고 주파수를 변화시키면서 실험하였다.

3.1.1. 음속변화에 따른 BER 실험

음속의 양 (+)기울기와 부 (-)기울기의 경우, 실험한 결과는 각각 그림 (6) 및 (7)과 같다.

음속구조 변화는 음선의 굴절을 야기하여 전달손실과 음선의 도착 시간에 영향을 준다. 그러나 그림 (6), (7)처럼 수중통신에서 S/N에 대비한 BER의 전체적인 특성이 유사한 것을 볼 수 있다. 등속인 경우와 마찬가지로 BPSK, QPSK, MSK는 거의 유사하게 나타나고, GMSK만 성능이 비교적 비효율적으로 나타나는데, 약 5dB 정도의 차이로 등속인 경우와 큰 차이는 없다.

3.1.2. 해저면 경사각에 따른 BER 실험

경사면의 기울기 변화는 그림 (8)과 같이 경사각 10도에 대하여 정방향과 역방향을 실험하였다. 송/수신기는 동일 수심 40m에 있으며, 등음을 가정하였다.

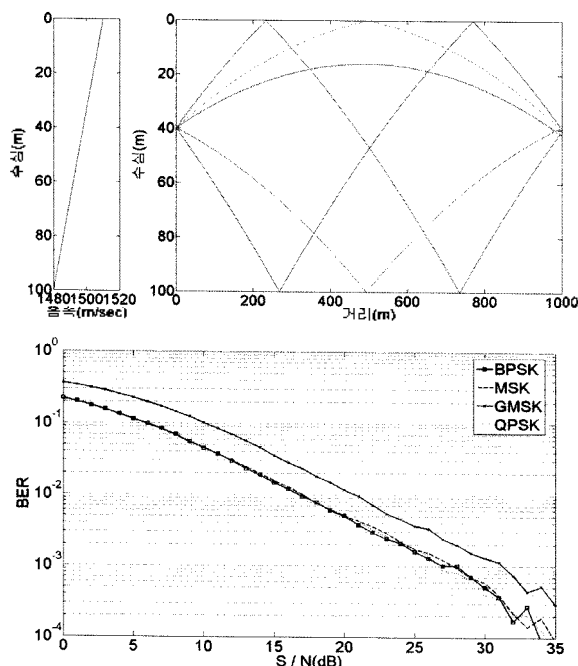


그림 6. 양 기울기에서의 고유음선 형태 및 변조방식별 BER
Fig. 6. Eigen rays in the positive gradient SSP and the BER according to modulation methods.

표 2. 정방향에서의 고유음선

Table 2. Eigen rays in the up-slope.

No	전송거리 (m)	전송시간 (sec)	전달손실 (dB)	UP bounce	DOWN bounce
1	1021.1	0.67619	8.4951	1	1
2	1008.1	0.66762	7.8615	0	1
3	1000	0.66225	0.00007	0	0
4	1003.4	0.66448	0.44595	1	0
5	1022.3	0.67701	8.5196	1	1

표 3. 역방향에서의 고유음선

Table 3. Eigen rays in the down-slope.

No	전송거리 (m)	전송시간 (sec)	전달손실 (dB)	UP bounce	DOWN bounce
1	1034.4	0.68503	8.3766	0	1
2	1000	0.66225	0.00007	0	0
3	1003.4	0.66448	0.44595	1	0

상기 실험에서 경사도에 대한 정 방향과 역방향의 경우 고유음선은 큰 차이로 수신된다.

표 (2), (3)에서 보듯이 해저 경사면의 기울기 변화를 제외한 동일한 조건에서 고유음선은 유사한 형태로 수신된다. 최단 전송거리 음선을 기준으로 역방향의 경우에는 경사면의 기울기가 없는 경우와 큰 차이가 나지 않고, 정방향의

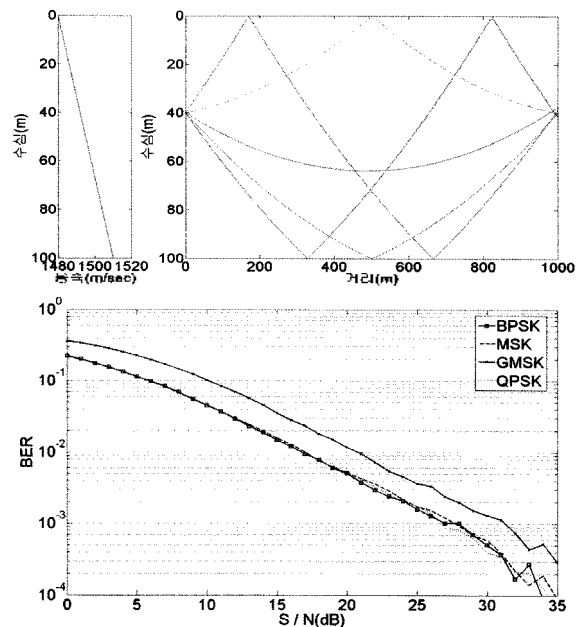


그림 7. 음 기울기에서의 고유음선 형태 및 변조방식별 BER
Fig. 7. The eigen rays in the negative gradient SSP and the BER according to modulation methods.

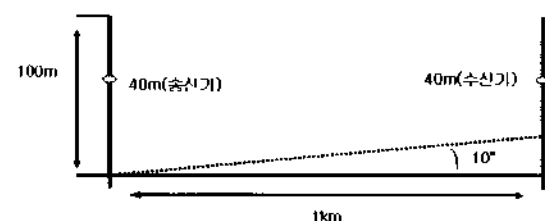


그림 8. 해저 경사면 기울기의 변화
Fig. 8. Variations of bottom slope gradient.

표 4. 주파수 변화에 따른 전달손실(dB) 변화
Table 4. Variations of TL according to frequency.

No	10kHz	100kHz
1	9.24919	15.14778
2	7.85460	7.88799
3	0.03436	0.06755
4	1.2226	7.12068
5	9.24919	15.14778

경우에도 수신된 고유음선의 수량을 제외하고는 큰 차이를 보이지 않는다.

경사면의 기울기에 의한 BER실험 결과는 그림 (9), (10)과 같다.

정방향과 역방향에서 실험 결과 경사면이 없는 경우와 거의 유사하게 나왔으며, 큰 차이는 없다.

3.1.3. 주파수의 변화에 따른 BER 실험

고유음선은 송신 주파수가 변화하면 식 (6), (7)에 따라 전달손실의 차이가 발생하며 음선의 도달 거리나 도착 시간에는 영향을 주지 않는다. 주파수를 10과 100 KHz로 변화시키면 표 (4)와 같은 전달 손실의 변화를 볼 수 있다.

표 (4)에서 보듯이 10KHz와 100KHz에서의 전달손실은 큰 차이를 보이고 있으며, 위 결과를 입력한 주파수의 변화에 따른 변조 방식별 BER 실험 결과는 그림 (11), (12)과 같다.

그림 (11), (12)에서 보듯이 주파수에 의한 변조방식별 BER 특성은 내략 주파수의 크기와 무관하게 같으나, 전반

적으로 100KHz에서 BER이 좋게 나오는 것을 볼 수 있는데 그 이유는 3.1.4절에서 분석하겠다.

3.1.4. 환경변화에 따른 QPSK의 BER 변화

상기 실험결과를 바탕으로 환경변화에 의해 정량화된 BER 값의 변화를 알아보기 위하여 QPSK 변조방식을 환경 변수에 따라 BER 값을 산출하였다. 그림 [13]는 수온, 주파수 및 해저면의 변화에 따른 QPSK의 BER 값이다.

그림 (13)에서 BER의 변화는 유사하나 주파수 100KHz에서 전반적으로 BER이 향상된 것을 볼 수 있다. 그 이유는 주파수의 증가는 전달손실을 크게 하고, 상대적으로 해저/해표면의 반사와 굴절이 심한 간접파는 직접파 보다 손실이 크게 된다. 결과적으로 식 (9)에 의하여 E_b 에 비하여 N_0 의 값이 작아지므로 BER이 좋아지게 된다. 그러나 주파수의 증가는 직접파의 수신음압도 작게 하므로 수중통신에서 반드시 효율적인 것을 의미하지는 않는다.

그림 (14)는 그림 (13)의 일부구간을 확대한 것이다.

그림 (14)에서 보면 해저면 변화 (정방향)에서 BER이 다소 좋게 나오는 것을 볼 수 있다. 정방향은 역방향보다 간접파의 수 (고유음선)가 상대적으로 적다. 그러므로 간접파의 수가 일시적으로 적기 때문에 생기는 현상이며, 해저면 변화 (정방향)에서 BER이 좋아진다고 하기는 어렵다.

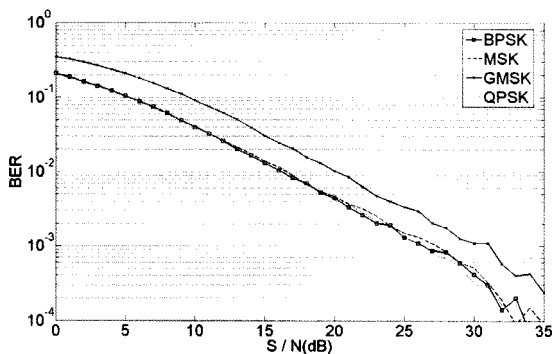


그림 9. 정방향에서의 변조방식별 BER
Fig. 9. BER according to modulation methods in the up-slope.

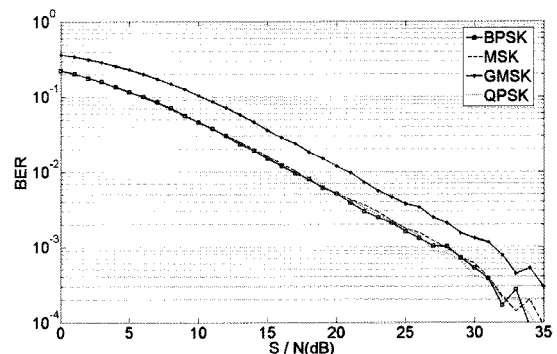


그림 11. 10KHz 변조방식별 BER
Fig. 11. BER according to modulation methods at 10KHz.

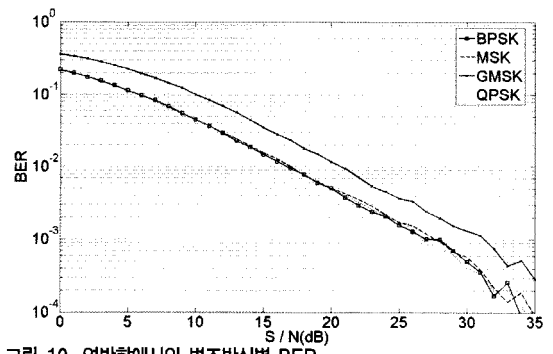


그림 10. 역방향에서의 변조방식별 BER
Fig. 10. BER according to modulation methods in the down-slope.

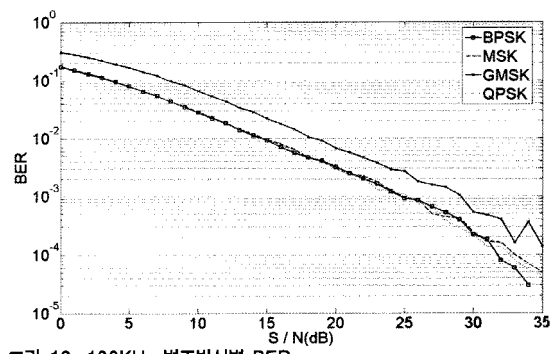


그림 12. 100KHz 변조방식별 BER
Fig. 12. BER according to modulation methods at 100KHz.

3.1.5. 모의실험 결과 요약

위 결과를 요약하면 수중에서 PSK 기반의 변조방식별 효율 (BER)은 GMSK를 제외하고 나머지 BPSK, QPSK, MSK에서 유사하게 나타나며,

BPSK, QPSK, MSK의 BER이 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 의 경우에 GMSK 보다 약 5dB 정도 높다.

환경변수의 변화에서 수온의 변화는 고유음선의 속도와 굴절을 변화시키고 경사면 기울기의 변화는 고유음선의 반사방향과 반사 횟수를 변화시킨다. 또한 주파수의 변화는 고유음선의 전달손실을 변화시키나 BER 특성은 변하지 않았다. 다만 환경변수에 따른 QPSK 변조방식의 BER 특성에서 주파수의 변화는 상대적으로 직접파에 비해 간접파의 전달손실을 크게 하여 BER이 향상되는 것을 확인하였다.

3.2. 채널환경 모의 및 실험결과

앞서 변조방식에 따른 BER 모의실험 결과는 각 환경 변수들에 대한 디지털 변조방식 효율이다. 모의실험결과와 검증에 위하여 남해 일부지역의 지형과 음속의 실측 데이터로 채널환경을 모의하여 변조방식별 BER을 실험하였고, 변조방식이 통신에 미치는 영향을 검토하기 위하여 변조방식별 영상자료 전송시 전송시간과 전송거리를 산출하였다.

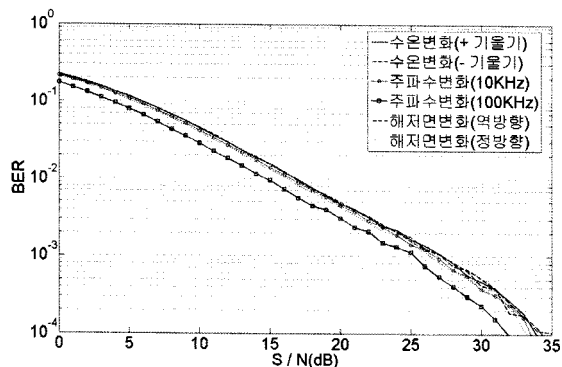


그림 13. 환경변화에 따른 QPSK의 BER변화
Fig. 13. BER variations of QPSK according to environmental factors.

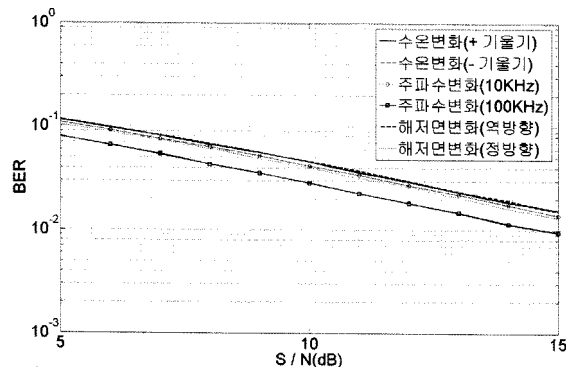


그림 14. 5~15dB 구간의 BER
Fig. 14. BER in the section between 5 to 15 dB.

표 5. 변조방식별 SNR 비교

Table 5. SNR-Comparisons according to modulation methods.

구 분	BPSK, QPSK, MSK	GMSK
10^{-2}	15dB	20dB
10^{-3}	20dB	25dB

채널환경은 부산근해 남방 15km구간을 모의하였고, 수온은 변화가 심한 8월 KODC (Korea Oceanographic Data Center) 실측 데이터를 입력하였다. 또한 송수신 위치는 수신 40m로 하였다. 실험결과는 그림 (15)과 같다

모의된 채널환경에서는 총 15개의 고유음선이 수신되었으며, 해표면과 해저면에서 반사된 음선은 없다. 상기 결과를 바탕으로 주파수 변조방식별 BER 실험결과는 그림 (16)과 같다.

그림 (13)의 결과와 그림 (15), (16)을 연관시켜 분석하면, 그림 (15)은 고유음선이 해표면이나 해저면의 반사가 없고 전달형태가 유사하여 직접파와 간접파간 수신된 시간과 음압의 차이가 극히 적으며, 또한 음속의 변화에 따른 굴절에 의해 직접파보다 간접파가 더욱 음압이 큰 경우도 있다. 그러므로 그림 (13)의 결과와 같이 수신음파간 전달 손실의 차이가 적어 BER이 상대적으로 저조하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

또한 공통적으로 PSK 변조방식 중 BPSK, MSK, QPSK는 거의 일정한 값을 보이고 있으며, GMSK만 약 5dB 정도의 나쁘게 산출되고 있음을 확인할 수 있다. 그림 (16)에서

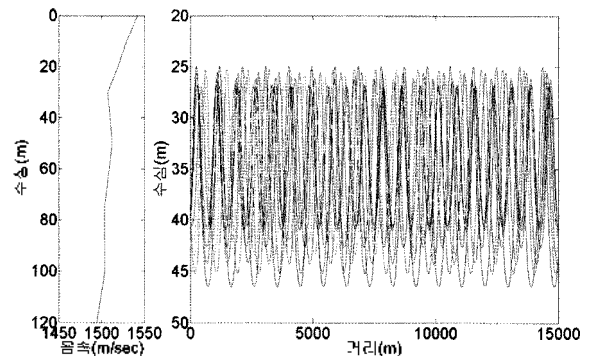


그림 15. 채널 모의환경에서의 고유음선
Fig. 15. Eigen rays of a channel simulation.

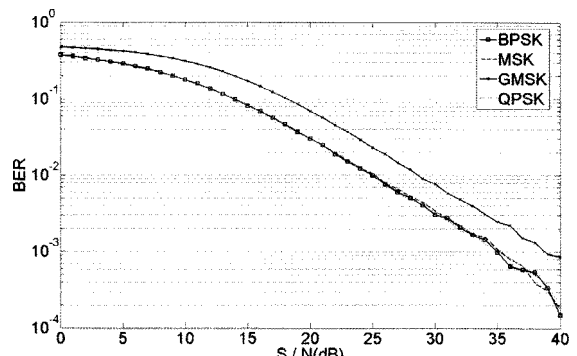


그림 16. 채널 모의환경에서의 변조방식별 BER
Fig. 16. BER according to modulation methods in the simulated environments.

BPSK, MSK, QPSK는 BER 10^{-2} 에서 SNR을 약 25dB 정도를 요구하고, GMSK는 30dB을 요구하며, 10^{-3} 에서는 BPSK, MSK, QPSK가 약 35dB을 요구하고 GMSK는 약 40dB 정도를 요구한다. 즉, 수중환경을 고려하여 SNR을 35dB 이하로 가정하면 GMSK는 10^{-3} 이상의 BER 값을 구현할 수 없다.

변조방식별 BER이 통신에 미치는 영향을 평가하기 위하여 대역폭 효율이 유사한 QPSK와 GMSK의 두 가지 경우에 한하여 통신에서 변조방식이 미치는 영향을 채널용량과 사용 주파수의 상관관계로 평가하였다. 채널용량은 이진신호를 가정할 때 식 (11) 같이 정의된다 [11].

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (\text{bit/sec}) \quad (11)$$

여기서 B는 채널의 대역폭이며, S는 수신신호준위 (dB), N은 소음준위 (dB)이다.

수중소음은 해상상태 및 선박소음 등 그 원인과 정도에 따라 다양하게 분포한다. 일반적으로, 천해에서의 소음준위는 5.4KHz 이상 대역에서 약 45~65dB로 분포하며 대부분 50dB 정도에서 분포한다 [12]. 또한 수신신호 준위는 송신신호 준위에서 전달손실과 소음준위를 뺀 값으로 식 (12)과 같다.

$$S = SL - TL - N \quad (\text{dB}) \quad (12)$$

여기서 SL은 송신신호 준위, TL은 전달손실 이다.

식 (11)과 식 (12)에서 송신신호 준위를 100dB로 하고 소음준위를 최대치인 65dB로 가정하여 채널용량을 산출하였다. 그림 (17)은 채널 모의환경에서 주파수, 채널용량 및 S/N의 관계를 나타낸 것이다.

그림 (17)에서 보듯이 SNR은 주파수와 반비례 관계를 이룬다. 식 (6, 7)에서 주파수가 커지면 전달손실 (TL)이 증가하게 되기 때문이다. 또한 주파수의 크기는 식 (11)에 따라 채널용량에 영향을 미치게 되는데 약 7KHz에서 채널용량은 최대값을 갖게 되고, 그 이하에서는 다시 작아지게 된다. 그림 (16)과 그림 (17)에서 QPSK는 10^{-2} 이상의 BER에서 SNR 25dB 이상을 요구하므로 약 8KHz 이하의 주파수를 사용할 수 있으나, GMSK는 30dB 이상을 요구하므로 5KHz 이하의 주파수를 사용할 수 있다. 또한 채널용량은 QPSK가 60Kbps 이상의 채널용량 확보가 가능하며, GMSK는 45Kbps 정도의 채널용량 확보가 가능함을 알 수 있다.

위의 두 가지 변조방식이 통신에서의 정량화된 차이를 검토하기 위하여 거리와 SNR을 변화시키며 실험하였다. 우선 거리는 식 (6)에 따라 전달손실 (TL)을 증가시키고 전달손실의 증가는 SNR을 감소시켜 채널용량이 작아지게 된다. 그림 (18)은 주파수 사용대역별 채널용량과 거리에 따른 변화를 산출한 것이다.

그림 (17)과 그림 (18)의 결과로부터 음성통신시 (10^{-2} BER, 1Kbps 채널용량 기준)의 통신가능 거리와 영상자료 (3×10^6 픽셀, 픽셀당 정보량 4bit) 전송시의 시간을 산출할 수 있다. 그림 (18)에서 7KHz의 경우, QPSK와 GMSK가 10^{-2} 의 BER을 유지하려면 각각 60Kbps, 70Kbps의 채널용량을 확보해야 하며, 통신 가능거리는 15Km, 7Km 정도이다. 즉 약 8Km의 전송거리 이득이 발생한다. 또한 10^{-2} 의 낮은 BER로 영상자료를 전송시 QPSK는 60Kbps, GMSK는 45Kbps를 확보하여 전송시간은 각각 약 20초와 27초로 약 7초의 이득이 발생한다. [13]-[17]

IV. 결론

본 논문에서는 PSK 계열의 주파수 변조방식에 따른 수중통신의 효율을 비교하였고, 결과는 BPSK, QPSK, MSK가 GMSK보다 효율이 높음을 확인하였다. 그리고 음속, 해저면 기울기, 주파수의 세 가지 변수를 변화시킨 결과 주파

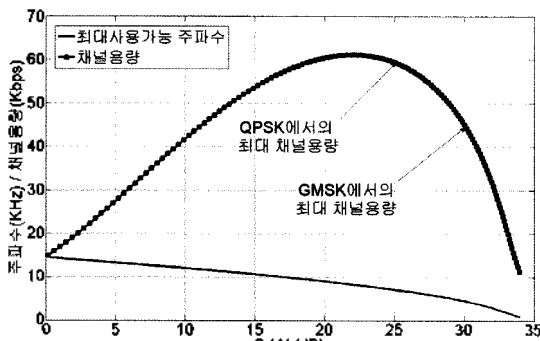


그림 17. 주파수, 채널용량 및 S/N의 관계
Fig. 17. Relations among frequency, channel capacity, and S/N.

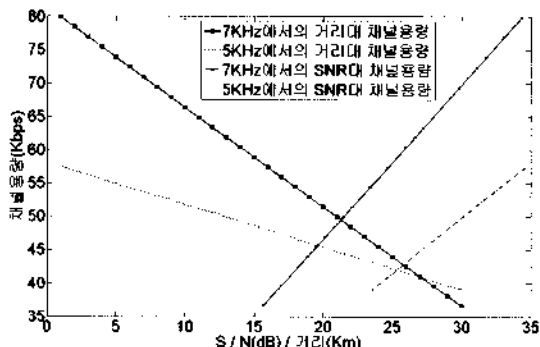


그림 18. 주파수 채널용량 및 거리와의 관계
Fig. 18. Relations among frequency, channel capacity, and distance.

수의 변화에서만 주파수의 크기에 따른 전체적인 BER이 향상되는 것을 확인하였다.

위 결과를 검증하기 위해 부산 남방 근해의 채널환경을 묘사하여 실험한 결과 전체적인 BER은 낮게 나왔으나, BPSK, QPSK, MSK와 GMSK는 상대적인 BER이 같게 산출되었다.

또한 변조방식별 차이를 정량화하기 위하여 음성통신과 3×10^5 픽셀 (픽셀당 정보량 4bit)의 영상전송을 모의한 결과 음성통신 시 약 8Km의 차이를 나타냈으며, 15Km 거리 영상전송은 10^{-2} 의 낮은 BER에서 약 7초의 이득이 발생함을 확인하였다.

그러나 상기 실험은 모의된 환경에서의 제한된 변수에 의한 실험으로 수중음향 채널에서의 다중경로에 의한 잔향과 도플러 확산 등에 의한 영향은 충분히 고려하지 않았다. 추후 연구로는 수중통신 환경요소를 더욱 정밀하게 반영한 모델을 구축하여, 수중체 이동시의 영향과 여러 가지 통신 기법의 반영을 통한 수중 네트워크 구성에 관한 연구를 계속할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음.

참고 문헌

1. Simon Haykin and Michael Moher, "Analog and Digital Communications Second Edition", 한티미디어, 471~477, 2007
2. 정준열, "수중 패시브 잔류개이선 기법을 이용한 수중음향통신" (정보통신공학과 석사논문)
3. Konstantin G.Kebkal and Rudolf Bannasch, "Ultrasonic link for improved incoherent data transmission in horizontal shallow water channels," Proc. Ocean. 4, 1786~1792, September 2003.
4. M. Suzuki and T. Sasaki, "Digital acoustic image transmission system for deep sea research submersible," IEEE Oceanic Eng. Conf., 567-570, Newport, Oct. 1992.
5. M. Stojanovic, J. A. Catipovic, and J. G. Proakis, "Adaptive multi-channel combining and equalization for underwater acoustic communications," J. Acoust. Soc. Amer., 94, 1621 - 1631, 1993.
6. M. Stojanovic, J. A. Catipovic, and J. G. Proakis, "Phase-coherent digital communications for underwater acoustic channels," IEEE J. Oceanic Eng., 19, 100 111, 1994.
7. 박지현, 백승관, 노용주, 윤종라 "수중통신채널에서 FSK, BPSK, DPSK의 성능비교" 한국해양정보통신학회지, 5 (1) 359-362, 2001.
8. 차재삼, 이종현, 강장목, 왕진천 "최신 이동통신 시스템" (그린출판사, 2006, 509)
9. William S. Burdic "Underwater Acoustic System Analysis" (Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 451, 1991)

10. 신윤기, "통신이론", (인태비전, 2007) pp. 553~566
11. C.E.Shannon and W.Weaver, "The Mathematical Theory of Communication", (Univ Illinois Press, 1949)
12. L.B.Bertholf, "Shallow Water Ambient Noise Level in The Tongue of The Ocean", (31, 1969)
13. 송희천, "수중음향통신", 한국음향학회지 13 (4) 94~101, 1994
14. 조진수, 심태보 "해저 경사면 조간하의 수중음향 통신을 위한 최적위치 선정 기법" 한국음향학회지, 25 2(s), 31~36, 2006
15. 김혁훈, 주국경, 김덕경, 심태보 "수중음향채널에서 STBC MIMO 시스템 적용 기법", 한국음향학회지, 26 1(s), 155~158, 2007
16. 정진우, 조진수, 신기철, 심태보 "수중데이터 통신 시스템에서 ARQ를 이용한 적응변조 기법", 한국음향학회지, 26 1(s), 159~162, 2007
17. 임병욱, 윤관섭, 권대용, 심태보 "수중복원사 적응 BISMO 알고리즘 설계", 한국음향학회지, 26, 1(s), 163~166, 2007

저자 약력

• 조진수 (Jin-Soo Cho)



1997년: 해군사관학교 경영학과 졸업
 2000년~2002년: 해군 군수사 특수무기 정비과장
 2006년~ 현재: 숭실대학교 전자공학과 석사과정

• 정승백 (Seung-Back Jung)



2002년: 한리대학교 컴퓨터 공학과 졸업
 2004년: 숭실대학교 산업기술정보통신 대학원 졸업 (공학석사)
 2007년~ 현재: 숭실대학교 전자공학과 박사과정

• 심태보 (Taeho Shim)



1974년: 서울대학교 문리대 졸업
 1980년: 서울대학교 문리대 대학원 졸업 (물리 해양학 석사)
 1986년: 미국 Louisiana 주립대학교 졸업 (물리해양학 박사)
 1986년~2005년: 국방과학연구소 해양/음향 연구실장, 해양기술부장, 해군 무기체계 개발본부 본부장 역임
 2005년~ 현재: 숭실대학교 정보통신전자 공학부 교수

* 관심분야: 수중음향 모델링, 수중음향 신호처리, 수중음향 통신, 수중음향 영상처리