



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

수중음향통신에서 프레임 동기화  
심볼 타이밍 동기화에 대한 연구

濟州大學校 大學院

에너지應用시스템學部 電子工學專攻

梁 景 弼

2023 年 2 月

# 수중음향통신에서 프레임 동기화 심볼 타이밍 동기화에 대한 연구

指導教授 高 碩 峻

梁 景 弼

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2022 年 12 月

梁景弼의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長

도 양 회



委 員

김 경 연



委 員

고 석 준



濟州大學校 大學院

2022 年 12 月



A Study on the Frame Synchronization and  
Symbol Timing Synchronization in Underwater  
Acoustic Communication

Kyeong-Pil Yang  
(Supervised by Professor Seok-jun Ko)

A thesis submitted in partial fulfillment  
of the requirement for the degree of  
Master of Science

Major of Electronic Engineering  
Faculty of Applied Energy System  
Graduate School  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2022. 12.

## 목차

LIST OF FIGURES .....	ii
LIST OF TABLES .....	iv
Abstract .....	v
제 1 장 서론 .....	1
제 2 장 송수신기 모델링 .....	2
2.1 PSK 변조방식 기반 송수신기 모델링 .....	2
제 3 장 타이밍 동기 .....	5
2.2 수중 음향 통신에서 타이밍 동기 구조 .....	5
2.3 프레임 동기 .....	6
2.4 심볼 타이밍 동기 .....	12
제 4 장 해상실험 결과 분석 .....	14
4.1 2020 해상실험 타이밍 동기 결과 .....	14
4.2 2022 해상실험 타이밍 동기 결과 .....	24
제 5 장 결론 .....	39
참고문헌 .....	41

## LIST OF FIGURES

Fig. 1 Transmitter structure .....	7
Fig. 2 Receiver structure .....	8
Fig. 3 Transmitter structure .....	9
Fig. 4 Frame Synchronization block diagram .....	10
Fig. 5 Frame Synchronization algorithm .....	11
Fig. 6 Coherent correlation block diagram .....	12
Fig. 7 Sliding FFT block diagram .....	13
Fig. 8 Sliding FFT result .....	14
Fig. 9 Noncoherent correlation result .....	15
Fig. 10 Noncoherent correlation block diagram .....	15
Fig. 11 STR algorithm .....	16
Fig. 12 TED S-curve .....	17
Fig. 13 2020 Sea Experimental environment .....	19
Fig. 14 Transmitted signal packet structure .....	19
Fig. 15 Received signal power (ch16) .....	20
Fig. 16 Noncoherent correlation result .....	21
Fig. 17 Sliding FFT result .....	22
Fig. 18 Coherent correlation result .....	23
Fig. 19 Frame Synchronization result .....	24
Fig. 20 BER before STR .....	25
Fig. 21 STR result (Frame 1) .....	26
Fig. 22 STR result (Frame 5) .....	26
Fig. 23 2022 Sea Experimental environment .....	29
Fig. 24 Received signal power .....	30
Fig. 25 Noncoherent correlation result .....	31
Fig. 26 Noncoherent correlation result (Frequency domain) .....	32
Fig. 27 Noncoherent correlation result (Time domain) .....	33
Fig. 28 Coherent correlation result .....	34
Fig. 29 Frame synchronization result .....	35
Fig. 30 Correlation delay result (32km) .....	36
Fig. 31 Correlation delay result (67km) .....	37
Fig. 32 STR result (32km, 200bps) .....	38

Fig. 33 STR result (32km, 500bps) .....	39
Fig. 34 STR result (32km, 1000bps) .....	39
Fig. 35 STR result (67km, 200bps) .....	40
Fig. 36 STR result (67km, 500bps) .....	41
Fig. 37 STR result (67km, 1000bps) .....	41

## LIST OF TABLES

Table 1 Experimental parameter .....	18
Table 2 2020 underwater acoustic experiment BER result .....	27
Table 3 Experimental parameter .....	28
Table 4 2022 underwater acoustic experiment BER result (ch8) .....	42



## Abstract

Underwater acoustic communication has limited underwater channel characteristics such as channel characteristics, delay time, and Doppler frequency caused by the mobility of transmitter and receiver and sea level variability, making it difficult to apply the existing ground radio communication method.

In particular, the time delay of the signal occurs due to the mobility of the transmitter and receiver and the propagation delay of sound waves. So the synchronization process is essential. In the synchronization process, frame synchronization for checking the start point of the transmission signal and symbol timing synchronization generated by time delay are required. Therefore, in this paper, transmitter and receiver structure suitable for timing synchronization of the BPSK modulated signal is designed.

The transmission signal should be detected and compensated for a change in a received signal due to a Doppler frequency caused by a channel environment using a synchronization algorithm. Therefore, in this paper, we propose an algorithm that acquires a starting point and symbol timing of data through a frame synchronization algorithm of 2-STEP and an algorithm that compensates for time delays within symbol. An algorithm structure for detecting the start point and Doppler frequency of the received signal was applied by performing frame synchronization twice between Probe and Preamble. In addition, the starting point of the frame can be obtained through the Noncoherent correlation algorithm in STEP 1 of frame synchronization, and the starting point of the frame and the initial Doppler frequency can be obtained more accurately with an algorithm to compensate the received signal in STEP 2. In addition, the timing error of data caused by time delay after

frame synchronization is applied by applying a Symbol Timing Recovery (STR) algorithm that detects timing error values using Gardner's Timing Error Detector (TED) algorithm.

The purpose of this paper is to verify the performance of the transmitter and receiver and synchronization algorithm through simulation and sea experiments and to proceed with the synchronization process with more stable performance. As a result of the frame synchronization algorithm, the position of the frame was confirmed in most signals, and the BER results showed that data errors were reduced in most signals when timing synchronization was performed through the symbol timing synchronization algorithm.

## 초록

수중 음향 통신에서는 다중 경로에 의한 주파수 선택적 페이딩 채널 환경으로 인한 채널 특성의 변화와 지연 시간의 변화, 송수신기의 이동성과 해수면의 변동성으로 발생하는 도플러 주파수 등의 수중 채널 특성과 가용 가능한 주파수 대역이 한정적이므로 기존의 지상 무선 통신의 방식을 그대로 적용하기에는 많은 어려움이 있다. 특히 송수신기의 이동성, 음파의 전파 지연 등으로 인해 신호의 시간 지연이 발생하는데, 동기화 과정이 필수적이다. 동기화 과정 안에서도 송신 신호의 시작지점을 확인하기 위한 프레임 동기와 시간 지연으로 발생하는 심볼 타이밍 동기가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 BPSK 변조 신호의 타이밍 동기화에 맞는 송수신기 구조를 설계한다.

전송 신호는 채널 환경으로 인해 발생하는 도플러 주파수에 의한 수신 신호의 변화를 동기화 알고리즘을 이용하여 검출 및 보상해야 한다. 따라서 본 논문에서는 2-STEP의 프레임 동기 알고리즘과 심볼 단위 이내의 시간 지연을 보상하는 알고리즘을 통해 데이터의 시작지점과 심볼 단위 타이밍을 획득하는 알고리즘을 제안한다. Probe와 Preamble을 두 번 프레임 동기를 진행하여 수신 신호의 위치와 도플러 주파수를 검출하는 알고리즘 구조를 적용하였다. 또한, 프레임 동기의 STEP 1 과정에서 비동기 방식 상관 알고리즘을 통한 대략적인 프레임의 시작지점을 획득하는 동시에 Sliding FFT 알고리즘을 통해 대략적인 프레임의 시작지점과 초기 도플러 주파수를 획득하여 STEP 2 과정에서 수신 신호에 초기 도플러 주파수를 보상하는 알고리즘으로 프레임의 시작지점을 보다 정확하게 획득할 수 있다. 또한, 프레임 동기 이후 시간 지연으로 인해 발생하는 데이터의 타이밍 오차를 Gardner 방식의 TED(Timing Error Detector) 알고리즘을 이용하여 타이밍 에러값을 검출하는 STR(Symbol Timing Recovery) 알고리즘을 적용하여 심볼 단위 타이밍 동기를 진행한다.

송수신기와 동기화 알고리즘의 성능은 시뮬레이션과 해상실험을 통해 검증하고 보다 안정적인 성능으로 동기화 과정을 진행하는 것이 본 논문의 목적이다.

해상실험 결과를 통해 프레임 동기 알고리즘 결과 대부분의 신호에서 프레임의 위치를 확인하였고, BER 결과에서 심볼 타이밍 동기 알고리즘을 통해 타이밍 동기를 진행했을 때 대부분의 신호에서 데이터 에러가 감소하는 것을 확인하였다.

## 제 1 장 서론

수중 음향 통신에서는 전자기파를 사용하는 지상과는 달리 다중 경로에 의한 주파수 선택적 페이딩 채널 환경으로 인한 채널 특성의 변화와 지연 시간의 변화, 송수신기의 이동성과 해수면의 변동성으로 발생하는 도플러 주파수 등의 수중 채널 특성으로 인해 음파를 사용한다. 또한, 수중 음향 통신에서는 가용 가능한 주파수 대역이 한정적이므로 기존의 지상 무선 통신의 방식을 그대로 적용하기에는 많은 어려움이 있다. 특히 송수신기의 이동성, 음파의 전파 지연 등으로 인해 신호의 시간 지연이 발생하는데, 동기화 과정이 이루어져야 한다. 동기화 과정 안에서도 송신 신호의 시작지점을 확인하기 위한 프레임 동기화 시간 지연으로 발생하는 심볼 타이밍 동기가 필요하다[1]. 수중 음향 통신에서의 타이밍 동기는 국내외에서 활발히 연구가 진행 중이다. 국내에서 PN sequence를 이용하여 실제 수중 실험을 통한 성능을 확인하였고[2], ASK, FSK, QPSK 변조 방식에 대한 실험을 실제 단거리 해상 실험을 통해 송수신기의 성능을 확인하였다[3]. 또한 주파수 오차가 발생했을 때 프레임 동기화에 대한 연구가 1999년 진행되었다. 해외에서는 PSK 변조 방식 기반 송수신기를 이용한 실험을 1991년부터 단거리, 장거리 해상실험을 진행하여 타이밍 동기화 및 위상 동기화에 대한 연구를 진행하였다. 본 논문에서는 타이밍 동기화에 맞는 송수신기 구조를 설계한다.

전송 신호는 채널 환경으로 인해 발생하는 도플러 주파수에 의한 수신 신호의 변화를 동기화 알고리즘을 이용하여 검출 및 보상해야 한다. 따라서 본 논문에서는 2-STEP의 프레임 동기 알고리즘과 심볼 단위 이내의 시간 지연을 보상하는 알고리즘을 통해 데이터의 시작지점과 심볼 단위 타이밍을 획득하는 알고리즘을 제안한다. Probe를 이용하여 대략적인 수신 신호의 위치를 파악하여 타이밍 오차를 일정 범위 내로 줄이고, Preamble을 이용하여 정확한 수신 신호의 위치와 도플러 주파수를 검출하는 알고리즘 구조를 적용하였다. Probe와 Preamble로 두 번 프레임 동기를 진행하여, 보다 정확한 프레임의 시작지점을 획득할 수 있다. 또한, 프레임 동기의 STEP 1 과정에서 비동기 방식 상관 알고리즘을 통한 대략

적인 프레임의 시작지점을 획득하는 동시에 Sliding FFT 알고리즘을 통해 대략적인 프레임의 시작지점과 초기 도플러 주파수를 획득하여 STEP 2 과정에서 수신 신호에 초기 도플러 주파수를 보상하는 알고리즘으로 프레임의 시작지점을 보다 정확하게 획득할 수 있다. 또한, 프레임 동기 이후 시간 지연으로 인해 발생하는 데이터의 타이밍 오차를 Gardner 방식의 TED(Timing Error Detector) 알고리즘을 이용하여 타이밍 에러값을 검출하는 STR(Symbol Timing Recovery) 알고리즘을 적용하여 심볼 단위 타이밍 동기를 진행한다. 이때 STR 알고리즘의 타이밍 에러 결과는 신호의 상관을 통한 타이밍 딜레이 결과와 비교하여 그 성능을 비교하였다.

송수신기와 동기화 알고리즘의 성능은 시뮬레이션과 해상실험을 통해 검증하고 보다 안정적인 성능으로 동기화 과정을 진행하는 것이 본 논문의 목적이다. 해상실험 결과를 통해 프레임 동기 알고리즘 결과 대부분의 신호에서 프레임의 위치를 확인하였고, BER 결과에서 심볼 타이밍 동기 알고리즘을 통해 타이밍 동기를 진행했을 때 대부분의 신호에서 데이터 에러가 감소하는 것을 확인하였다.

## 제 2 장 송수신기 모델링

### 2.1 PSK 변조방식 기반 송수신기 모델링

Fig. 1은 PSK 변조방식에서 송신기 구조이다. 송신 신호 구조를 Frame generator에서 생성하고 Raised cosine filter로 필터링 후 반송파 주파수를 통해 상향 변환(up-conversion)하여 신호를 송신한다.

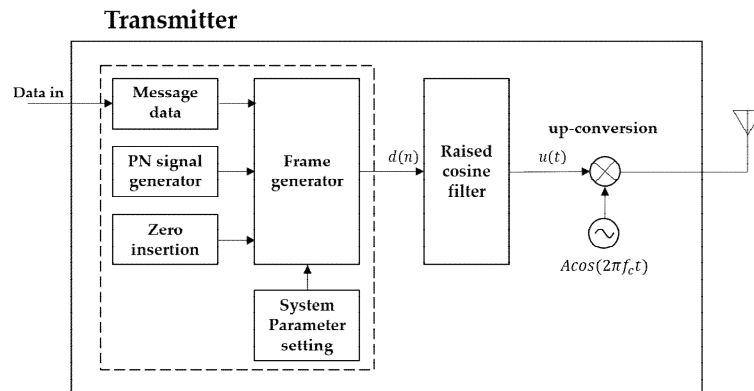


Fig. 1. Transmitter structure

펄스 정형 필터를 통과한 후의 신호  $u(t)$ 는 식 (1)과 같다.

$$u(t) = \sum_n d(n)p(t-nT) \quad (1)$$

여기서  $T$ 는 메시지 데이터(비트)의 주기이며,  $p(t)$ 는 펄스 정형 필터를 나타낸다. 따라서 송신기 최종 단에서 전송되는 신호는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$s(t) = A_t u(t) \cos(2\pi f_c t) \quad (2)$$

여기서  $A_t$ 는 송신기 이득,  $f_c$ 는 반송파 주파수를 나타낸다.

Fig. 2는 수중 환경 채널에서 통신을 위한 동기화 시험을 위해 설계한 수신기 구조이다 [17].

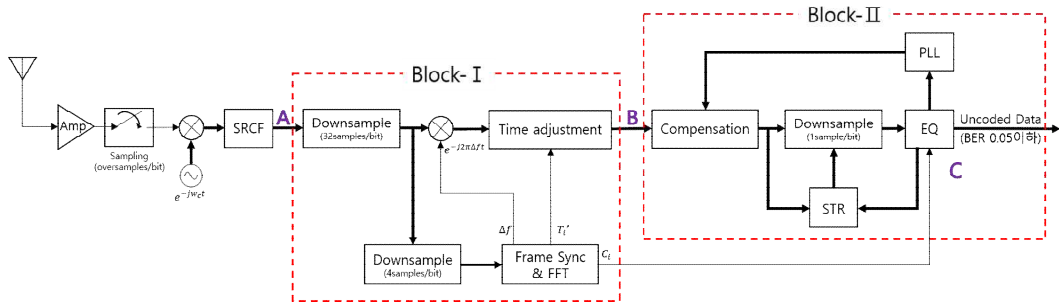


Fig. 2. Receiver structure

만약 송수신기 사이에 주파수 오차가 발생하지 않고, 수중 환경을 통과하더라도 반송파 주파수가 일치하게 되면 수신 신호는 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \underline{r}(t) &= A_r \sum_{l=1}^L \alpha_l(t) u(t - \tau_l) \exp \theta_l(t) \\ &= r^I(t) + jr^Q(t) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 밑줄(\_)은 복소 신호를 나타내며,  $A_r$ 는 수신 신호의 크기,  $L$ 은 다중 경로의 수,  $\alpha_l(t)$ 는  $l$ -번째 경로 신호의 진폭 변화,  $\tau_l(t)$ 는  $l$ -번째 경로 신호의 시간 지연,  $\theta_l(t)$ 는  $l$ -번째 경로 신호의 위상변화를 나타낸다. 본 연구에서 수행하고자 하는 프레임 동기는 식 (3)에서 신호의 세기가 가장 큰 경로의 시간 지연을 찾는 것이다. 예를 들어, 2번째 경로 신호  $\alpha_2(t)$ 의 세기가 가장 크다면  $\tau_2(t)$ 를 찾는 것이다. 따라서 2번째 경로 신호를 제외한 나머지 모든 신호는 간섭 신호가 되는 것이다. 본 논문에서는 Fig. 2의 수신기 구조에서 위상 동기인 Block-II 과정을 제외한 타이밍 동기 과정인 Block-I 과정을 진행한다. 이때 위상 동기 와 같이 동작하는 심볼 타이밍 동기 또한 본 연구를 통해 진행하였다.



## 제 3 장 타이밍 동기

### 3.1 수중 음향 통신에서 타이밍 동기 구조

수중 음향 통신에서 해양 채널 환경에 의해 발생하는 시간 지연과 다중 경로, 송수신부 시스템에서 발생하는 오실레이터의 불안정성 등으로 인하여 시간 지연이 발생한다[1],[6],[8]. 따라서 수신부에서 정확한 프레임의 시작지점을 찾고 수신 전력을 최대화하는 프레임 동기 기법을 사용한다[7].

Fig. 3은 타이밍 동기의 블록도이다. 수신기에서 신호를 수신하게 되면 블록도의 과정을 거쳐 데이터를 복원한다. 우선 수신된 신호를 오버샘플링하고 기저대역으로 하향변환(Down-Conversion)하고 SRCF(Scared root Raised Cosine Filter)로 필터링 후 프레임 동기 과정을 진행한다.

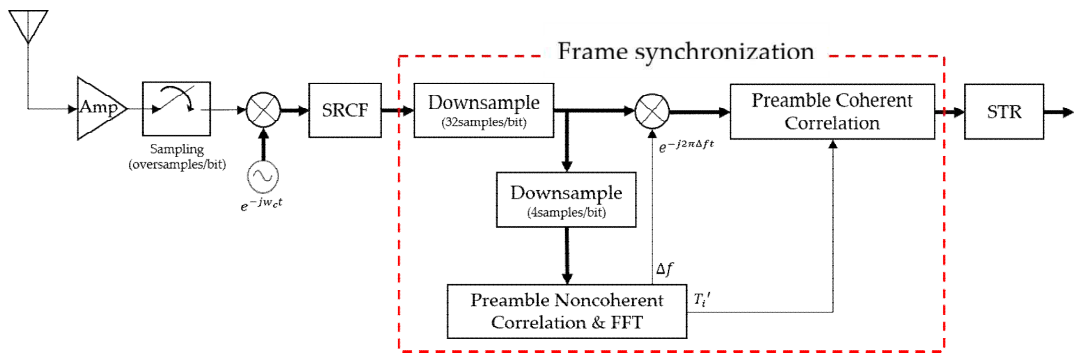


Fig. 3. Transmitter structure

프레임 동기 이후에는 시간 지연을 보상하기 위해 STR으로 발생한 심볼 딜레이를 확인하고 누적하여 보상하게 된다. 이는 해상실험 결과를 통해 STR을 보상하기 전과 후의 BER을 측정하여 STR로 시간 지연을 보상했는지 확인할 수 있다.

### 3.2 프레임 동기

#### 3.2.1 프레임 동기 블록도 및 알고리즘

Fig. 4는 수신 신호를 하향 변환한 이후의 프레임 동기화 블록도이며 Fig. 2-2에서 Block-I 과정을 보여준다.

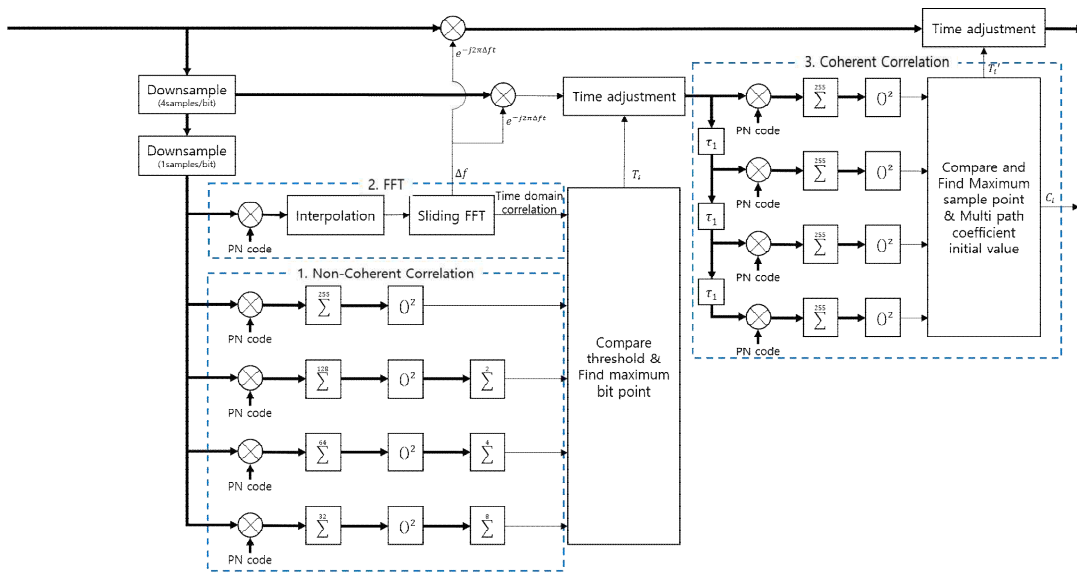


Fig. 4. Frame Synchronization block diagram

Fig. 5는 수중 채널을 통과하면서 발생한 시간 지연으로 인해 프레임의 시작지점을 찾기 위한 프레임 동기화 알고리즘이다[9]. 프레임 동기화는 총 2-STEP으로 진행된다. STEP 1에서는 프리앰블로 사용되는 PN code의 비동기방식 상관(Non-coherent Correlation)과정과 PN code의 Sliding FFT 과정이 동시에 진행된다[10],[11]. 이후 STEP 2에서는 PN code의 동기방식 상관(Coherent Correlation)이 진행된다. 프레임 동기에서 상관기와 FFT를 같이 사용하여 신뢰성과 안전성을 높일 수 있다. 이후에는 동기/비동기방식 상관기, Sliding FFT 방식으로 나누어 설명한다.

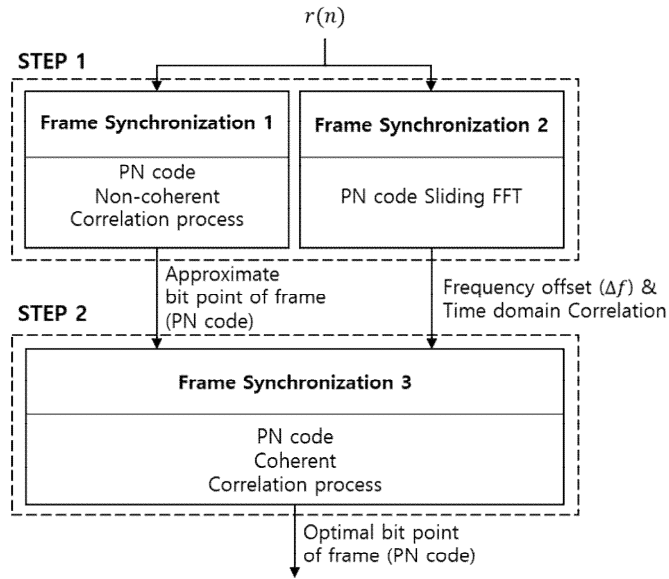


Fig. 5. Frame Synchronization algorithm

### 3.2.2 동기 상관 방식의 프레임 동기화

Fig. 5에서 신호가 확인되는 경우  $y_n^I(k)$ 와  $y_n^Q(k)$ 의 복소수 신호로 생성되고, 기저대역 수신 신호와 PN code  $a_n(k)$ 의 상호상관을 통해 타이밍이 맞는 경우 상관 값이 최대가 되고, 타이밍이 맞지 않은 경우 상관 값이 0에 가까워지는 자기상관 특성을 이용하여 프레임 동기를 진행한다. 이때 상호상관을 확인하는 식은 식 (4)와 같다.

$$\widehat{R}_{xy}(m) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{N-m-1} x_n + my_n^*, & m \geq 0 \\ \widehat{R}_{xy}(-m), & m < 0 \end{cases} \quad (4)$$

여기서  $x_n$ 과  $y_n$ 은 상호상관을 확인하고자 하는 두 신호이고,  $R$ 은 상호상관 시퀀스이다.

Fig. 6은 Fig. 5의 STEP 2의 Frame Synchronization 3 과정의 동기방식 상관 알고리즘이다. 본 논문에서의 동기 방식 상관에서는 주파수 오프셋을 보정한 한 비트당 4샘플로 샘플링된 신호를 PN code와 상관 값을 확인한다. 한 비트당 4샘플로 샘플링하면서 프레임 동기의 위치를 더욱 정확하게 확인할 수 있다.

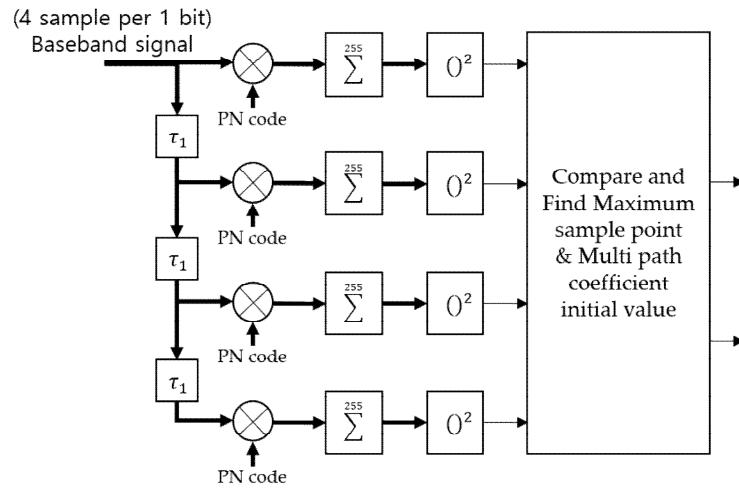


Fig. 6. Coherent correlation block diagram

### 3.2.3 Sliding FFT 방식의 프레임 동기화

수중 음향 통신의 채널 환경에 의해 발생하는 주파수 오차로 인하여 Fig. 5의 STEP 1의 Frame Synchronization 1 과정에서 Fig. 6과 같은 비동기 방식 상관을 진행했다. 하지만 주파수 오차가 큰 경우에 Main path 이외의 값이 상대적으로 크게 나타나서 Main path의 위치를 결정하기에는 어려움이 있다. 따라서 Fig. 7의 (a) 알고리즘을 이용하여, FFT를 이용해 얻은 주파수 오차를 보상하여 동기 방식 상관을 진행하는 FFT 방식의 타이밍 동기화를 진행한다. 이때 결과는 (b)와 같이 시간 영역과 주파수 영역에서 동시에 프레임의 시작 위치와 주파수 오차를 검출한다.

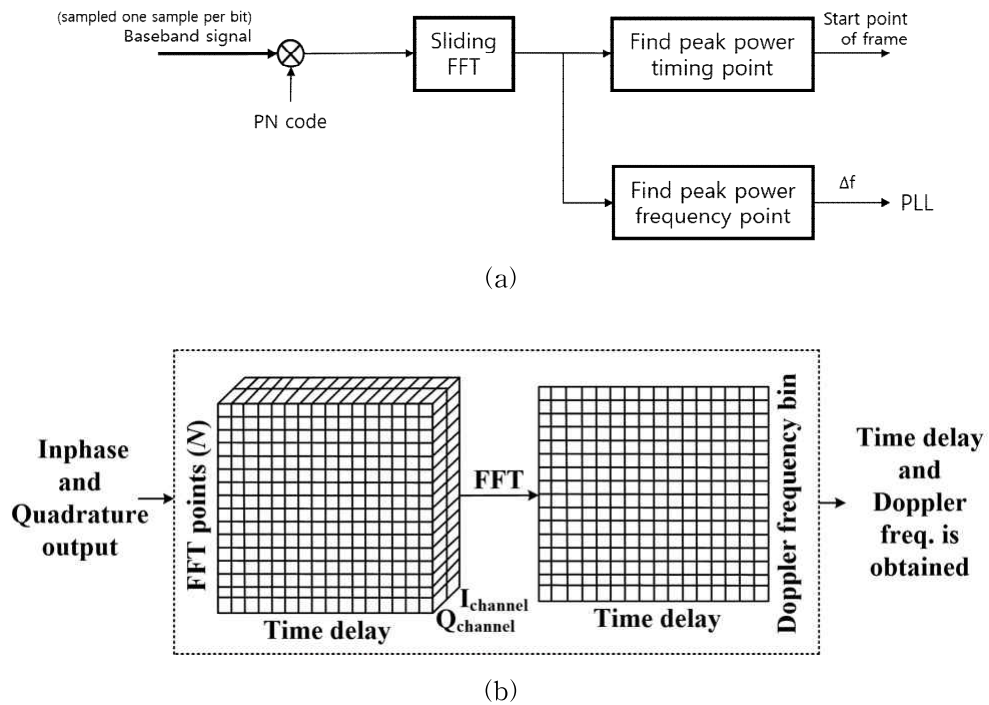
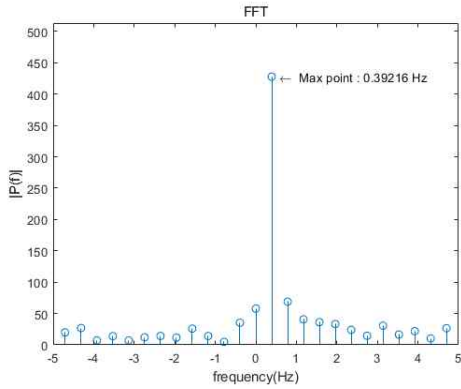
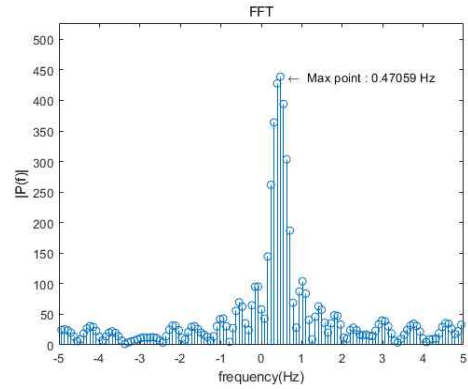


Fig. 7 Sliding FFT block diagram

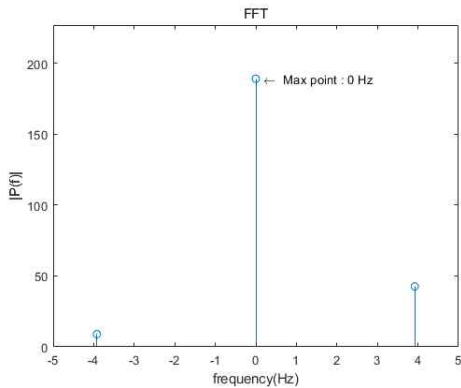
하지만 FFT는 입력 데이터의 개수에 따라 해상도(Resolution)가 결정되기 때문에 데이터 전송 속도에 따라 주파수 축에서의 해상도가 달라진다. 해상도에 따라 결과값이 달라지므로 데이터 전송 속도가 커지면 보상되는 도플러 주파수의 값과 실제 도플러 주파수가 달라진다. FFT 하고자 하는 신호 뒤에 zero 값을 넣는 Zero padding을 하여 입력 데이터의 개수를 늘리는 방식으로 FFT 결과의 해상도를 증가시킬 수 있다. Fig. 8은 해상실험에서 데이터 전송 속도가 100bps, 1000bps인 경우의 Sliding FFT에서 주파수 축의 결과를 보여준다. (a)와 (c)는 일반적인 Sliding FFT의 결과를 보여준다. (b)와 (d)는 Zero padding을 통해 입력 데이터를 증가 시킨 후의 FFT 결과를 보여준다. (c)의 결과에서 볼 수 있듯이 해상도를 증가시키지 않았을 때 도플러 주파수가 없다는 결과를 얻게 되지만, FFT의 해상도를 증가시킴으로써 0.38Hz의 도플러 주파수를 얻을 수 있다. 따라서 프레임 동기에서 동기 방식 상관을 진행할 때 더 정확한 상관 결과를 확인할 수 있다.



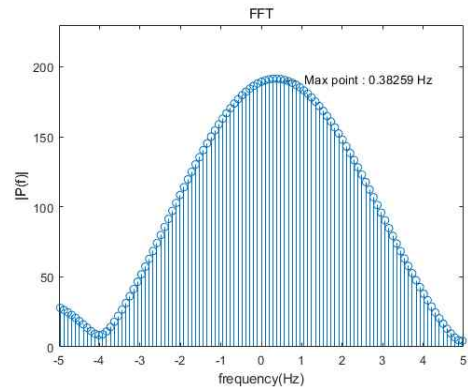
(a) 100bps before Zero padding



(b) 100bps after Zero padding



(c) 1000bps before Zero padding



(d) 1000bps after Zero padding

Fig. 8 Sliding FFT result

### 3.2.4 비동기 상관 방식의 프레임 동기화

수중 음향 통신의 채널 환경에 의해 발생하는 주파수 오차로 인하여 일반적인 상관방식으로는 PN sequence의 상관 값을 확인할 수 없다. Fig. 9는 주파수 오차에 따른 신호의 상호상관 시뮬레이션 결과를 보여준다. 이때 주파수 오차는 3Hz이다. 따라서 Fig. 10의 비동기 방식 상관 블록도의 과정에 따라 상관을 진행한다. 비동기 방식 상관에서는 PN sequence의 비율에 따라  $N_C$  만큼 프레임을 분할하여 상호상관 값을 누적하는데, 이 과정을 동기 누적이라 하고,  $N_C$  를 동기 누적 횟수라 한다. 이후 생성된  $Y^I(k)$ 와  $Y^Q(k)$ 를 각각 제공하여 합산하는데, 이

과정을  $N_{NC}$  만큼 누적한다. 이 과정을 비동기 누적이라 하고,  $N_{NC}$  를 비동기 누적 횟수라 한다.

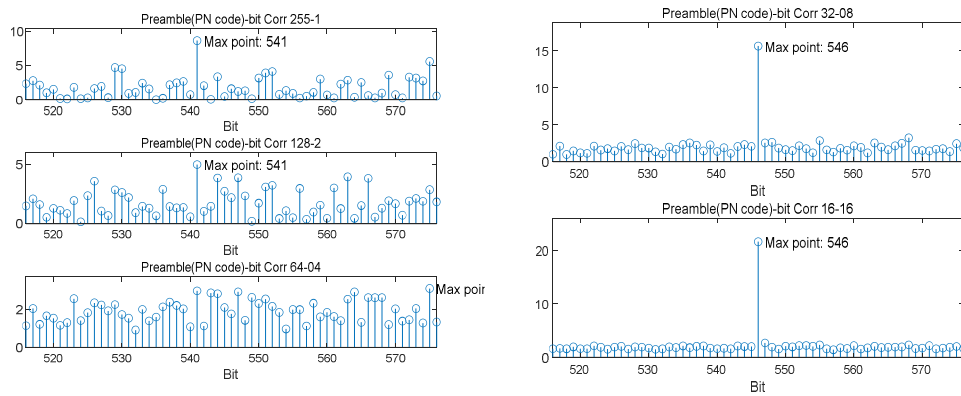


Fig. 9 Noncoherent correlation result

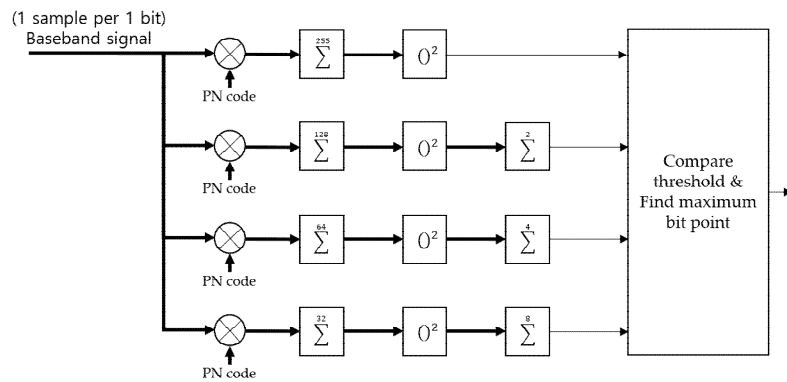


Fig. 10 Noncoherent correlation block diagram

### 3.3 심볼 타이밍 동기

수중 음향 통신에서 프레임 동기 이후, 매 심볼마다 시간 지연을 추적 및 보상하기 위해 STR(Symbol Timing Recovery)를 사용한다. Fig. 11은 STR의 알고리즘이다. STR의 구조는 TED(Timing Error Detector), 루프 필터(Loop Filter), NCO(Numerically Controlled Oscillator)로 구성된다

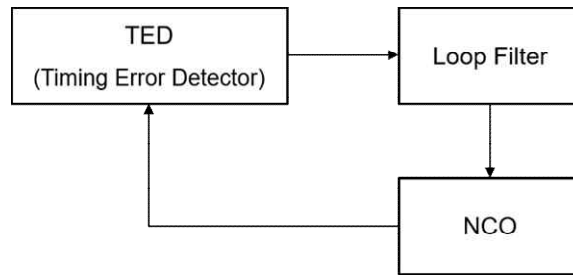


Fig. 11 STR algorithm

특히 본 연구에서 TED는 위상 에러에 강인하고 BPSK 변조방식에 많이 사용되는 Gardner 알고리즘을 이용한다[13],[14]. Gardner 방식의 타이밍 에러 검출기는 심볼당 2개의 샘플을 이용하여 타이밍 에러 값을 검출하고, 루프필터에서 타이밍 에러 값을 이용하여 시간 지연을 검출한 후, NCO에서는 타이밍 에러를 누적하여 샘플의 위치를 조정하여 시간 지연을 보상한다. 이때 타이밍 에러 함수는 식 (5)와 같다.

$$u(r) = y_I(r - \frac{1}{2})[y_I(r) - y_I(r-1)] + y_Q(r - \frac{1}{2})[y_Q(r) - y_Q(r-1)] \quad (5)$$

여기서  $y$ 는 수신된 신호,  $I$ 와  $Q$ 는 각각  $I$ ,  $Q$ -채널값, 그리고  $r$ 은  $r$ 번째 비트를 나타낸다. 또한  $(r-1/2)$ 은  $(r-1)$ 번째와  $r$ 번째의 중간 지점을 나타낸다.

Fig. 12는 Gardner 방식의 타이밍 에러 검출기의 특성(S-curve)이다.



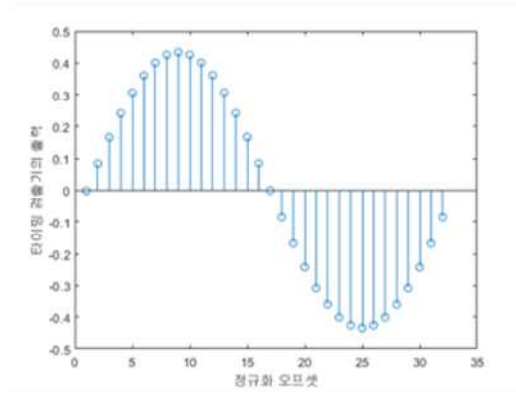


Fig. 12 TED S-curve

## 제 4 장 해상실험 결과 분석

### 4.1 2020년 해상실험 타이밍 동기 결과 분석

본 장에서는 제안한 PSK 변조방식 기반의 프레임 동기, 심볼 타이밍 동기의 알고리즘을 검증하기 위해 해상실험 결과를 분석한다. 해상실험은 2020년, 2022년 총 2회 동해에서 진행하였다.

#### 4.1.1 실험 환경

Table 1은 2020년 해상실험의 파라미터를 나타낸다.

Table 1 Experimental parameter

Modulation	BPSK
Distance	30 km
Transmitter depth	200 m
Receiver depth	179 ~ 221 m
Depth	~ 1700 m
Data rate	100 bps
Sampling frequency	16384 Hz
Carrier frequency	1.8 kHz
Preamble bit	510 bits
Data bit	336 bits

실험은 BPSK 변조방식을 사용하였고, 송수신기간 사이 거리는 30km, 송신기

깊이는 200m, 수신기는 179 ~ 221m, 수심은 최대 1700m, Data Rate은 100bps, 샘플링 주파수는 16384Hz, 반송파 주파수는 1.8kHz, 프리앰블은 510 비트, 데이터는 336비트로 송신 신호를 구성하여 실험을 진행하였다.

Fig. 13은 2020년 해상실험 환경을 보여주는 그림이다.

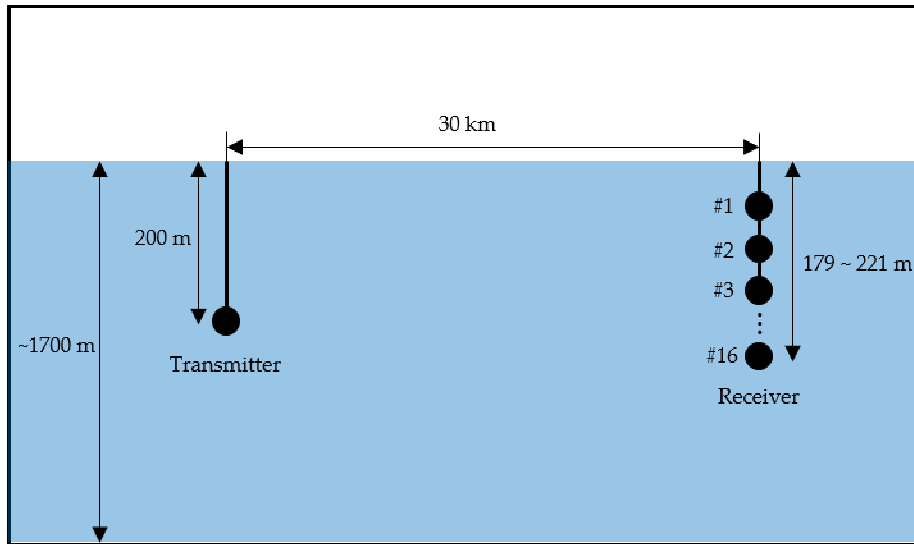


Fig. 13 2020 Sea Experimental environment

이때 수신기는 16개의 수신기를 사용하여 수심 179 ~ 221m 깊이에 각각 배치하여 총 16개의 수신 결과를 확인하였다.

#### 4.1.2 송신 신호 패킷 구성

Fig. 14는 2020년 해상실험의 송신 신호 패킷이다 [17].

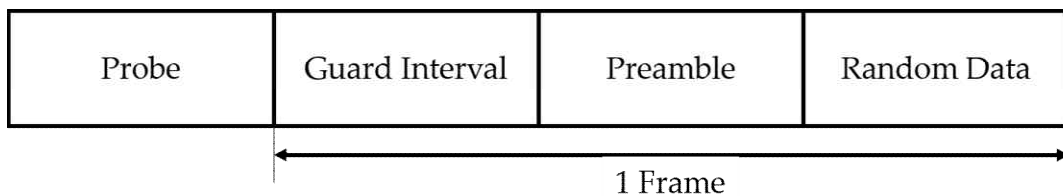


Fig. 14 Transmitted signal packet structure

송신 신호는 신호의 대략적인 위치를 확인하기 위해 Probe를 사용하였고, 프레임간 인접 심볼 사이 간섭을 방지하기 위한 Guard Interval, 프레임의 시작지점을 검출하기 위한 프리앰블과 랜덤데이터로 구성되어 있다. 이때 Probe는 Orthogonal code인 Walsh code를 사용하였고, 프리앰블은 PN sequence를 사용하였는데, 프리앰블의 경우 프레임 동기에서 PN sequence의 상관 결과를 확인할 때 랜덤데이터의 간섭 없이 상관 값을 정확하게 확인하기 위해서 255 비트의 PN sequence를 두 번 사용하였다. 이때 2020년도 해상실험에서는 Guard Interval, 프리앰블, 랜덤 데이터를 한 프레임으로 하여 Probe 이후에 5프레임으로 신호를 구성하여 실험을 진행하였다.

#### 4.1.3 프레임 동기 결과

Fig. 15는 2020년 해상실험의 1~16번 채널 중 16번 채널의 수신 신호의 전력이다. 이때 수신 신호는 Probe 하향 변환 이후의 기저 대역 신호이다. 이때 송신기의 특성으로 인해 수신 신호의 파워가 시간에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있다. 2020년 해상실험에서는 신호의 파워에 따라 High, low로 나누어 각각 프레임 1, 5번의 프레임 동기 결과를 비교한다.

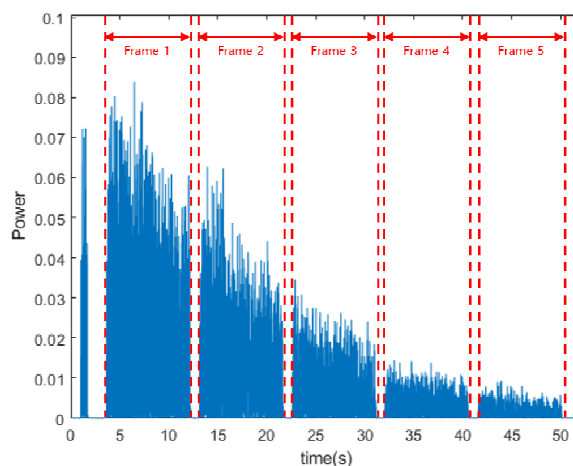
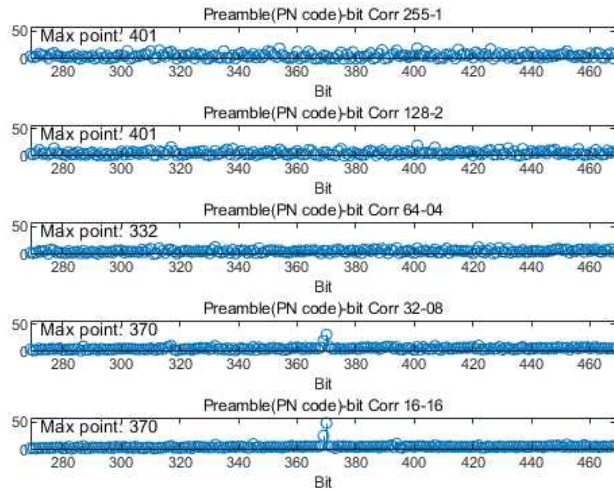
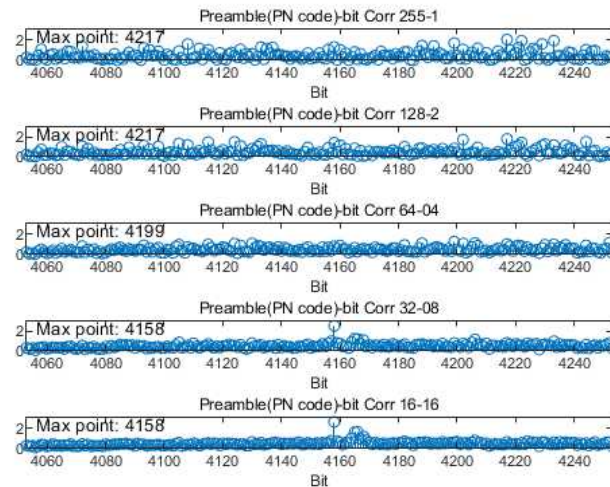


Fig. 15 Received signal power (ch16)

Fig. 16은 수신 신호의 비동기 방식 상관 결과를 보여준다.



(a) Frame 1

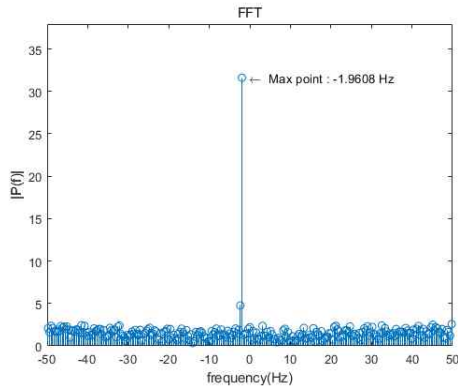


(b) Frame 5

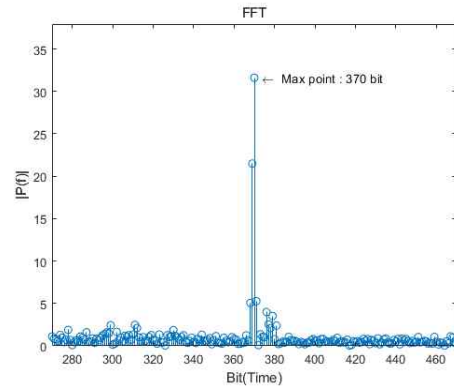
Fig. 16 Noncoherent correlation result

비동기 상관 결과에서 동기 누적 계수가 255인 경우에는 도플러 주파수의 영향으로 인해 상관 값을 확인할 수 없고, 동기 누적 계수가 64, 32인 경우에 상관 값을 확인할 수 있다. 이때 프레임 1, 5의 비동기 상관 결과로 각각 370, 4158 비트에서 상관 값을 확인할 수 있다.

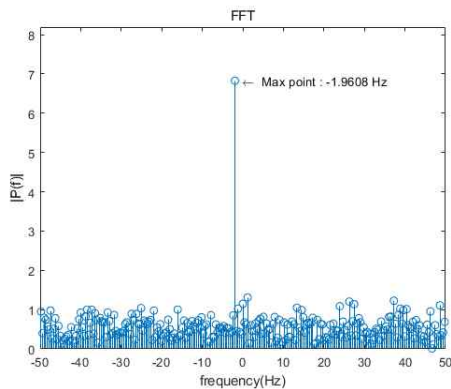
Fig. 17은 수신 신호의 Sliding FFT 결과를 보여준다. 이때 (a), (c)는 주파수 축에서의 FFT 결과, (b), (d)는 시간 축에서의 FFT 결과를 보여준다.



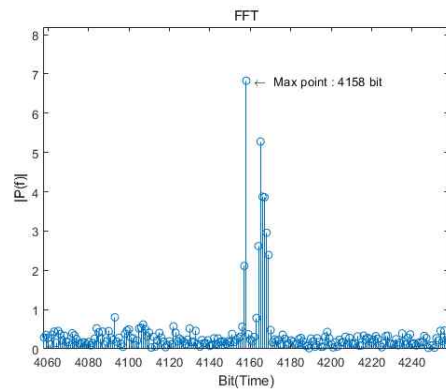
(a) Frequency domain (Frame 1)



(b) Time domain (Frame 1)



(c) Frequency domain (Frame 5)

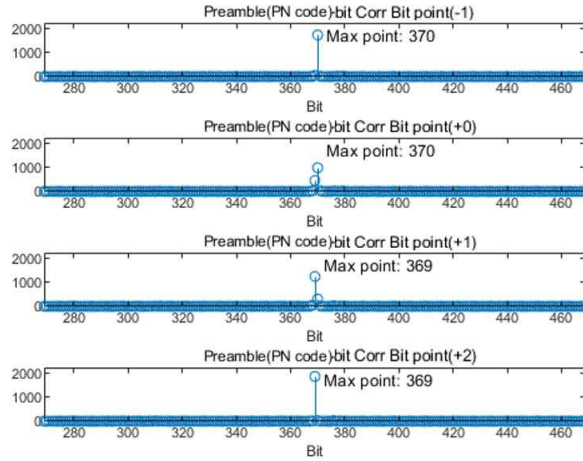


(d) Time domain (Frame 5)

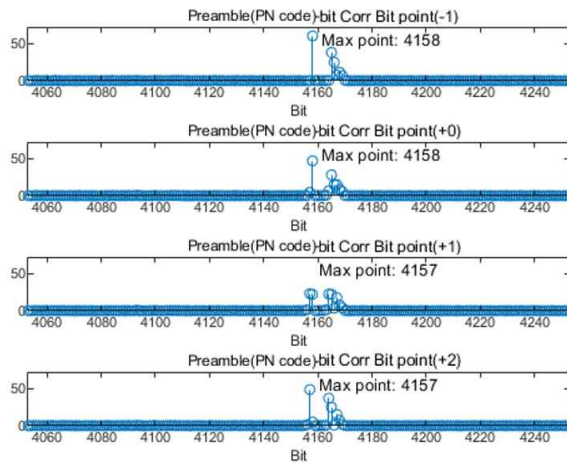
Fig. 17 Sliding FFT result

Sliding FFT의 두 결과 모두  $-1.96\text{Hz}$ 의 도플러 주파수를 확인할 수 있고, 시간 축에서는 비동기 방식 상관의 결과와 동일한 370, 4158 비트에서 최고값을 확인할 수 있지만 최고값 이외에도 지연 성분을 확인할 수 있다. 비동기 방식 상관과 Sliding FFT에서 얻은 최고 상관 값은 동기 방식 상관의 기준 비트로 이용되고, 도플러 주파수는 수신 신호에 보상하여 동기 방식 상관을 진행하여 송신 신호의 시작점을 확인한다.

Fig. 18은 수신 신호의 동기 방식 상관 결과를 보여준다.



(a) Frame 1



(a) Frame 5

Fig. 18 Coherent correlation result

동기 방식 상관의 결과에서는 1비트당 4샘플로 Downsampling된 신호의 상관 결과를 확인하고 그중 가장 큰 상관 값의 샘플을 프레임의 시작지점으로 한다. 또한 최고 상관 값과 멀티패스 이외에는 0에 가까운 값을 확인할 수 있다.

Fig. 19는 수신 신호의 프레임 동기 결과를 보여 준다.

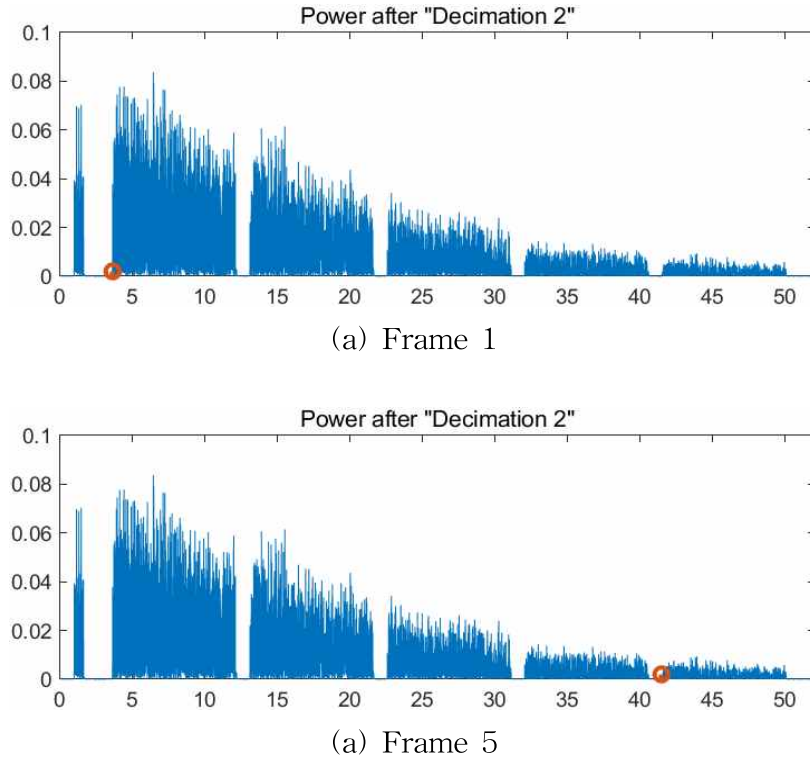
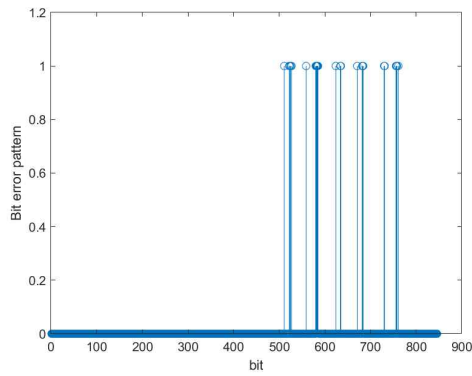


Fig. 19 Frame Synchronization result

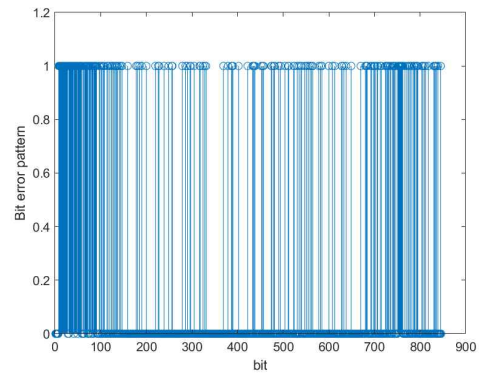
#### 4.1.4 심볼 타이밍 동기 결과

Fig. 20은 프레임 동기 이후 프리앰블을 포함한 데이터의 BER 패턴을 보여준다. BER 결과에서 프리앰블을 제외한 랜덤 데이터의 에러 개수는 각각 336개 중 25, 87개로 BER은 프레임 1은 0.07, 프레임 5는 0.26의 결과를 확인할 수 있다. 따라서 시간 지연으로 인해 프레임 동기 이후에도 타이밍 동기의 필요성을 확인할 수 있다. 따라서 프레임 동기 이후 심볼 타이밍 동기 알고리즘을 이용하여 타이밍 에러를 보상한다.





(a) Frame 1

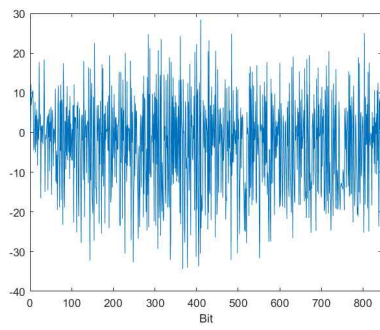


(a) Frame 5

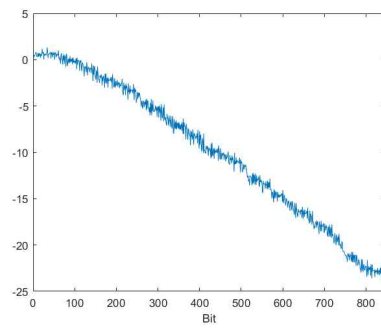
Fig. 20 BER before STR

Fig. 21과 Fig. 22는 각각 수신 신호 중 Frame 1, 5의 STR 및 타이밍 에러를 보상한 이후의 BER을 보여준다. (a)는 STR의 TED, (b)는 STR의 LF, (c)는 STR의 NCO, (d)는 STR의 시간 지연을 보정한 데이터의 BER 결과를 보여준다.

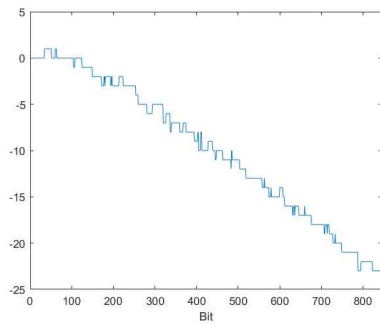
STR의 NCO 결과를 통해 846비트 동안 0 ~ -23 샘플의 딜레이가 발생함을 확인할 수 있다. STR을 통한 시간 지연을 보상하여 프리앰블을 제외한 랜덤 데이터의 에러 개수는 각각 336개 중 0개로 BER은 0로 시간 지연을 보상하기 전인 0.07보다 감소했음을 확인할 수 있다. Frame 5의 STR의 NCO 결과를 통해 846비트 동안 +5 ~ -16샘플의 딜레이가 발생함을 확인할 수 있다. 이때 동기 방식 상관이 1비트당 4샘플로 신호를 Downsample하여 상관을 진행하므로 1비트당 32샘플로 시간 지연을 보상하는 STR에서 +5 샘플의 딜레이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. STR을 통한 시간 지연을 보상하여 프리앰블을 제외한 랜덤 데이터의 에러 개수는 각각 336개 중 122개로 BER이 0.36으로 시간 지연을 보상하기 전 BER인 0.26보다 오히려 증가함을 확인할 수 있다.



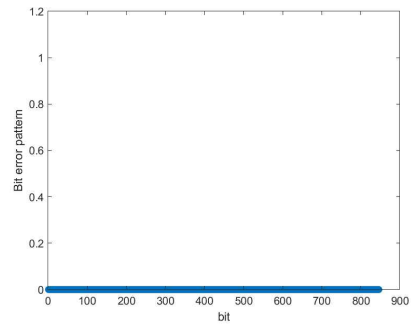
(a) TED result



(b) LF result

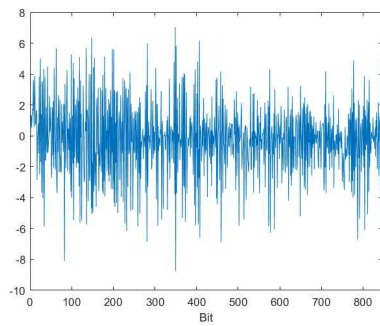


(c) NCO result

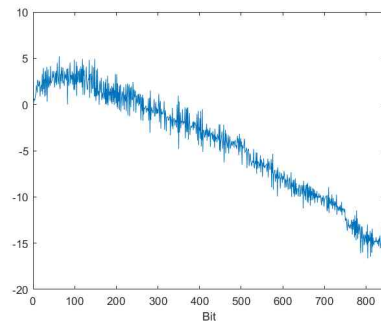


(d) BER after STR

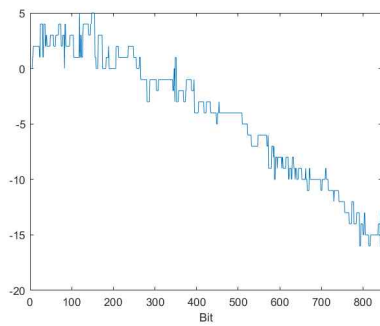
Fig. 21 STR result (Frame 1)



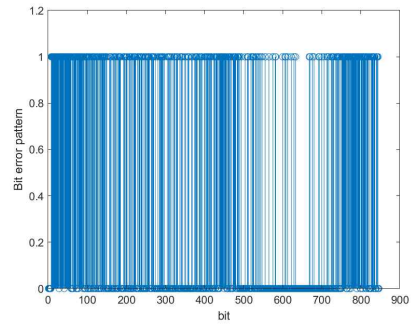
(a) TED result



(b) LF result



(c) NCO result



(d) BER after STR

Fig. 22 STR result (Frame 5)

Table 2는 2020년 해상실험 16번 채널의 시간 지연 보상 결과 전후의 에러 개수와 BER을 보여준다. 이때 에러 개수는 336 비트의 랜덤 데이터 구간의 에러 개수를 말한다.

Table 2 2020 underwater acoustic experiment BER result

Frame	시간 지연 보정 전		시간 지연 보정 후	
	Number of Error	BER	Number of Error	BER
1	25	0.07	0	0
2	24	0.07	0	0
3	30	0.09	0	0
4	60	0.18	26	0.07
5	87	0.26	122	0.36

이때 1, 2, 3, 4번 프레임의 STR의 시간 지연 결과 보상 후 결과는 STR의 시간 지연 결과 보상 전 결과에 비해 에러의 개수가 감소하여 BER가 감소한 것을 확인할 수 있다. 하지만 5번 프레임의 경우 오히려 BER이 증가함을 확인할 수 있다.

## 4.2 2022년 해상실험 타이밍 동기 결과

### 4.2.1 실험 환경

Table 3은 2022년 해상실험의 파라미터를 나타낸다.

Table 3 Experimental parameter

Modulation	BPSK
Distance	32 km / 67 km
Transmitter depth	100 m
Receiver depth	200 ~ 375 m
Depth	~ 1000 m
Data rate	100 / 200 / 500 / 1000 bps
Sampling frequency	100 kHz
Carrier frequency	3.2 kHz
Preamble bit	510 bits
Data bit	1000 / 1500 bits

실험은 BPSK 변조방식을 사용하였고, 송수신기간 사이 거리는 32, 67km로 두 번 실험하였다. 송신기 깊이는 100m, 수신기는 200 ~ 375m, 수심은 최대 1000m, Data Rate은 100, 200, 500, 1000bps, 샘플링 주파수는 100kHz, 반송파 주파수는 3.2kHz, 프리앰블은 510 비트, 데이터는 데이터 전송속도가 100 bps인 송신 신호에서는 1,000 비트, 200, 500, 1000 bps인 송신 신호에서는 1,500 비트로 송신 신호를 구성하였다.

Fig. 23은 2020년 해상실험 환경을 보여주는 그림이다.

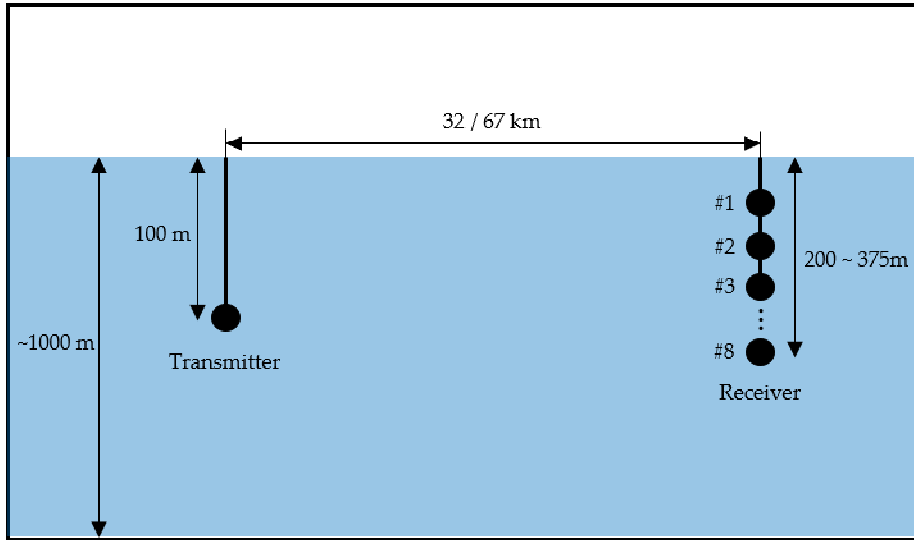


Fig. 23 2022 Sea Experimental environment

이때 수신기는 8개의 수신기를 사용하여 수심 200 ~ 375m 깊이에 각각 배치하여 총 8개의 수신 결과를 확인하였다. 송신 신호 패킷의 경우 Fig. 14의 송신 신호 패킷 구성과 동일하다. 송신 신호 패킷을 32km에선 2번, 67km에선 3번 동일 송신 신호 패킷을 송수신하였다. 2022년 해상실험에서는 2020년 해상실험에서 사용한 100bps를 제외한 200, 500, 1000bps의 신호에 대한 타이밍 동기 알고리즘을 통해 타이밍 동기를 진행한다.

#### 4.2.2 프레임 동기 결과

Fig. 24는 2022년 해상실험의 1~8번 채널 중 8번 채널의 수신 신호의 전력이다. (a), (b), (c)는 송수신기 사이 거리가 32km, (d), (e), (f)는 송수신기 사이 거리가 67km인 상황의 수신 신호의 전력이다. 이때 수신 신호는 Probe 하향 변환 이후의 기저 대역 신호이다.

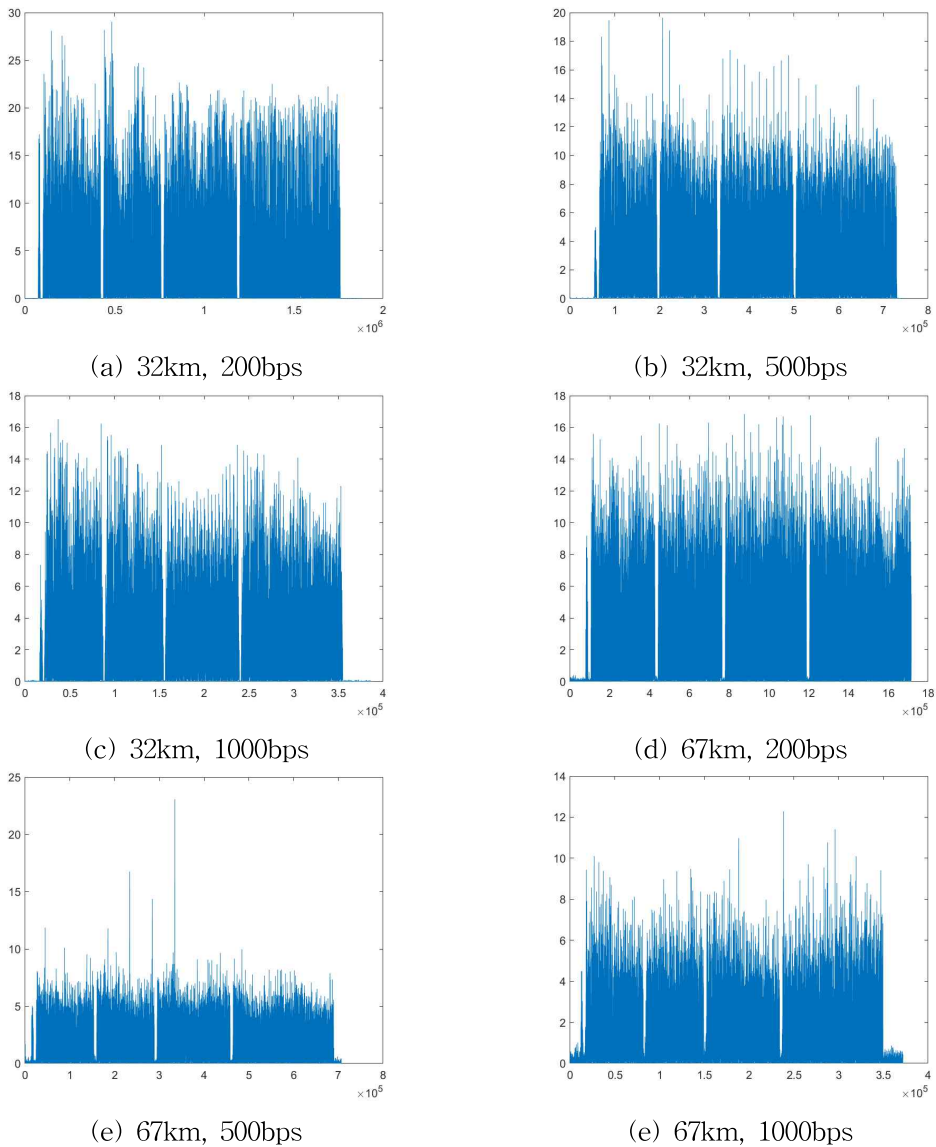


Fig. 24 Received signal power

Fig. 25는 수신 신호의 비동기 방식 상관 결과를 보여준다. 비동기 상관 결과에서 (a)에서는 동기 누적 계수가 64일때 가장 크고, (b)에서는 동기 누적 계수가 128일때 가장 크다. 하지만 (c), (d), (e), (f)에서는 동기 누적 계수가 255일때 가장 커서 도플러 주파수가 거의 없다고 예상할 수 있다.

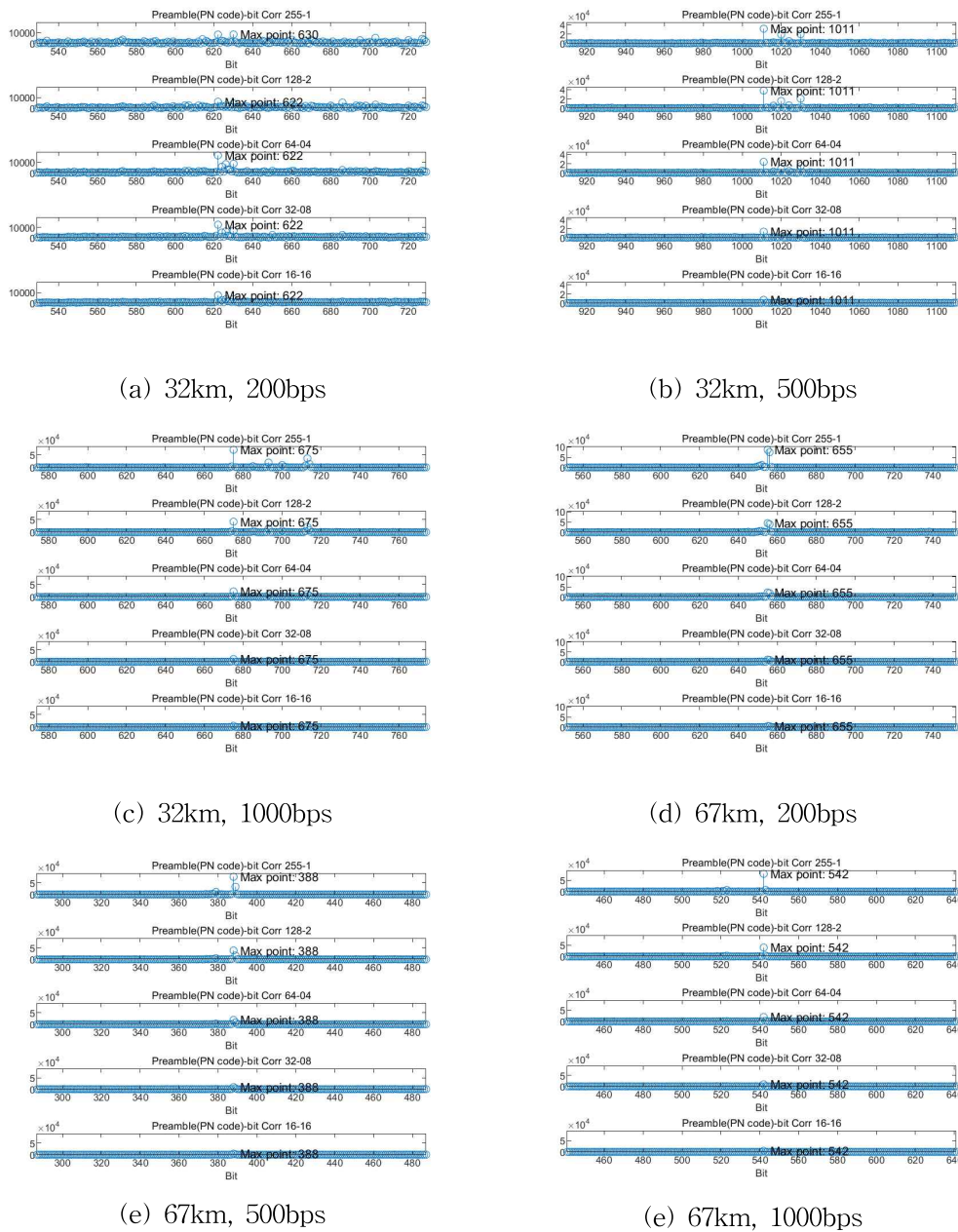
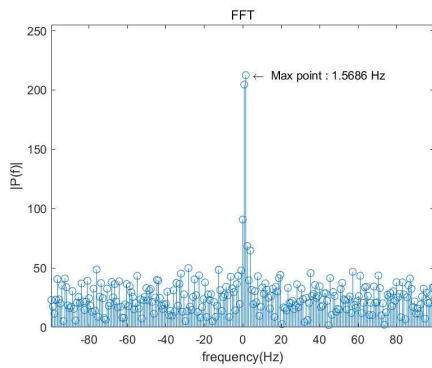
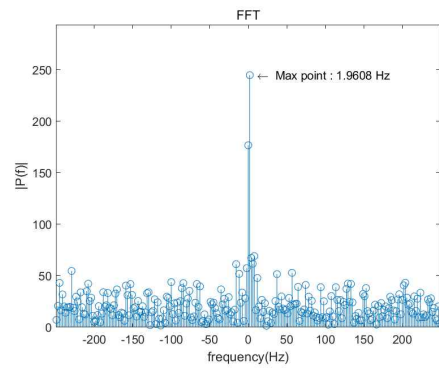


Fig. 25 Noncoherent correlation result

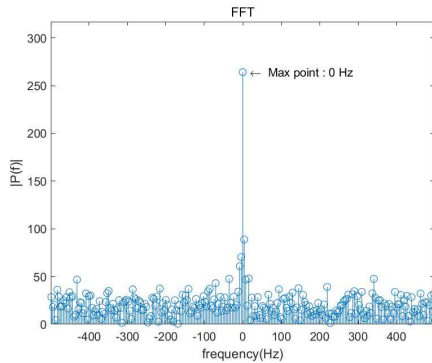
Fig. 26과 Fig. 27은 각각 수신 신호의 Sliding FFT의 주파수 축에서의 결과와 시간 축에서의 결과를 보여준다. Fig. 13의 (a)와 (b)를 통해 32km 200bps, 500bps에서는 각각 1.56, 1.96Hz의 도플러 주파수를 확인할 수 있고, 그 외의 그림에서는 도플러 주파수가 없는 것을 확인할 수 있다. 따라서 Fig. 12의 비동기 방식 상관 결과의 동기 누적 계수가 255일때 상관 값을 확인할 수 있다.



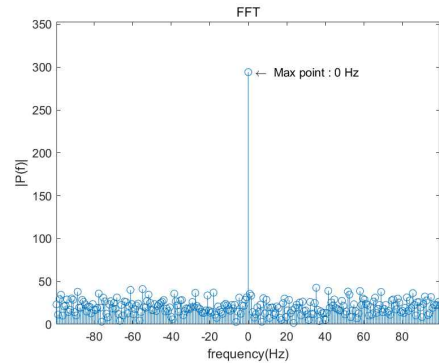
(a) 32km, 200bps



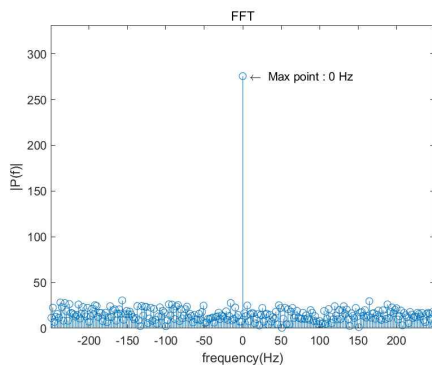
(b) 32km, 500bps



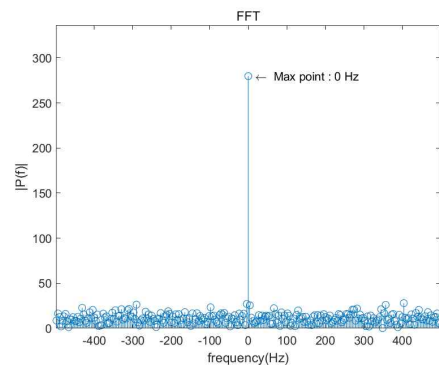
(c) 32km, 1000bps



(d) 67km, 200bps



(e) 67km, 500bps

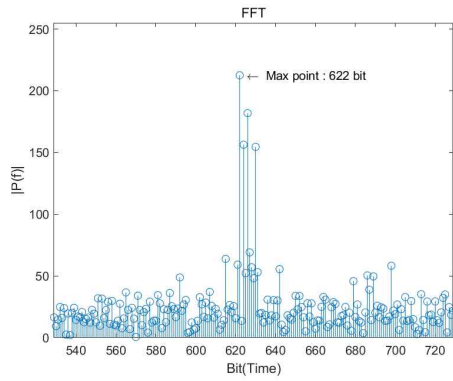


(f) 67km, 1000bps

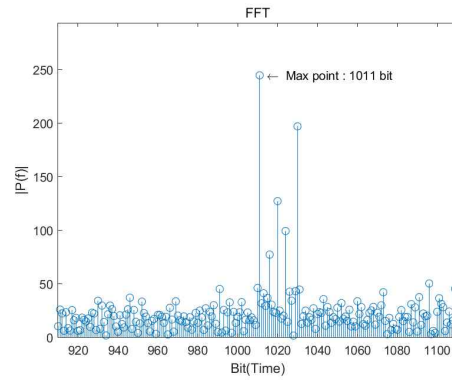
Fig. 26 Noncoherent correlation result (Frequency domain)



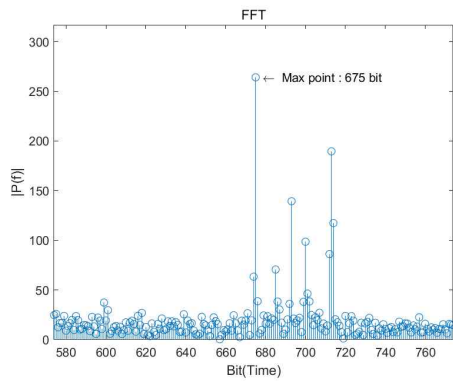
Fig. 27에서는 각각 비동기 방식 상관의 결과와 동일한 622, 1011, 675, 655, 388, 542 비트에서 최고값을 확인할 수 있지만 최고값 이외에도 지연 성분을 확인할 수 있다.



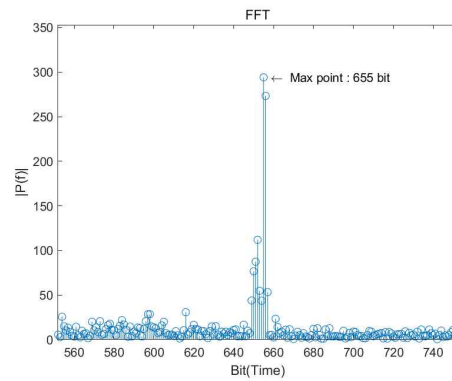
(a) 32km, 200bps



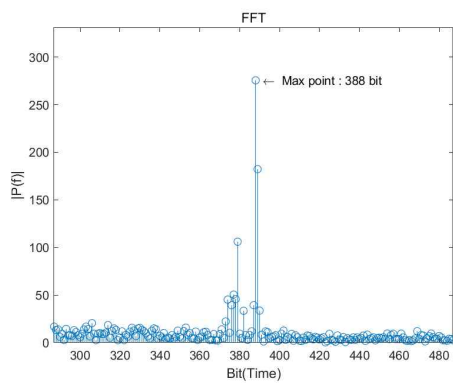
(b) 32km, 500bps



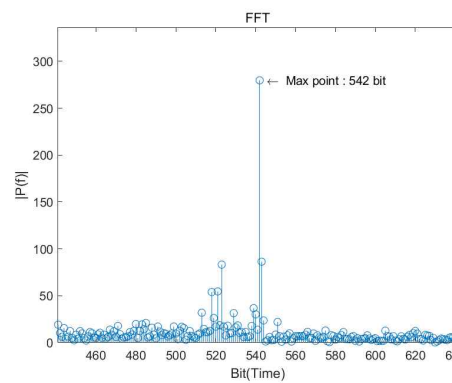
(c) 32km, 1000bps



(d) 67km, 200bps



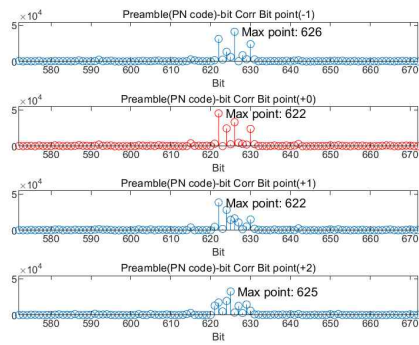
(e) 67km, 500bps



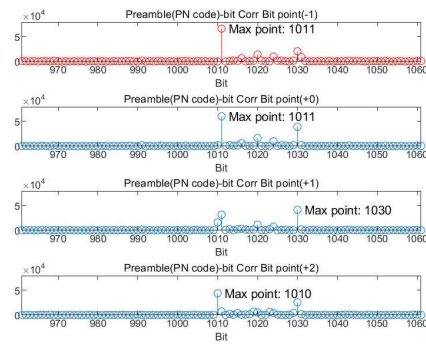
(e) 67km, 1000bps

Fig. 27 Noncoherent correlation result (Time domain)

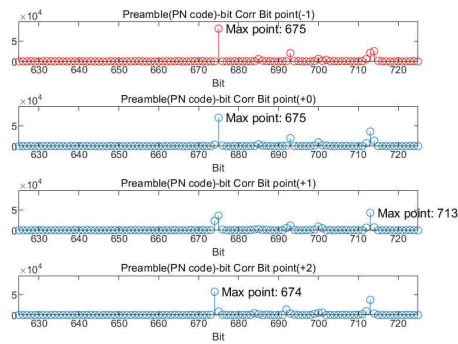
Fig. 28은 수신 신호의 동기 방식 상관 결과를 보여준다. 그림 (a)에서는 최고 상관 값 이외의 지점에서 최고 상관 값과 비슷한 크기의 멀티패스가 존재함을 확인할 수 있다.



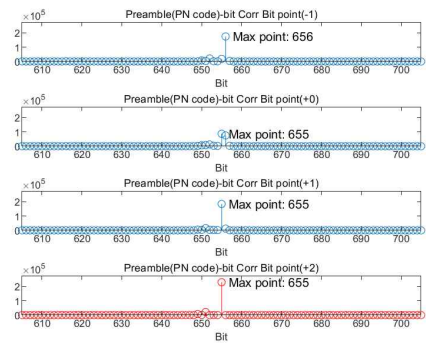
(a) 32km, 200bps



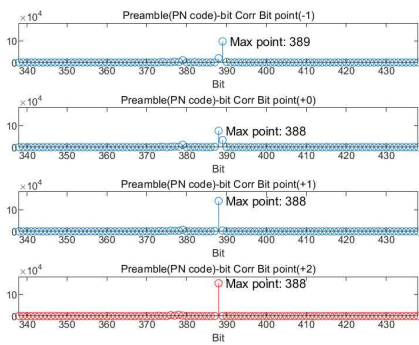
(b) 32km, 500bps



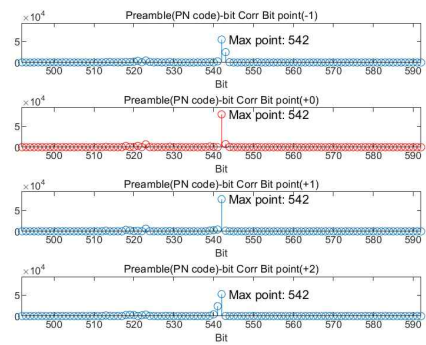
(c) 32km, 1000bps



(d) 67km, 200bps



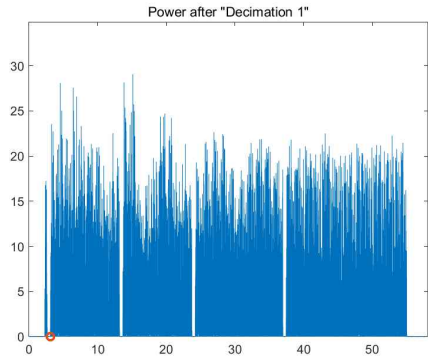
(e) 67km, 500bps



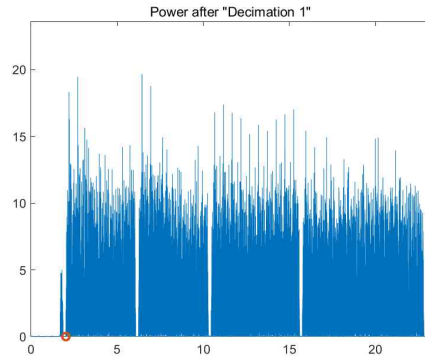
(e) 67km, 1000bps

Fig. 28 Coherent correlation result

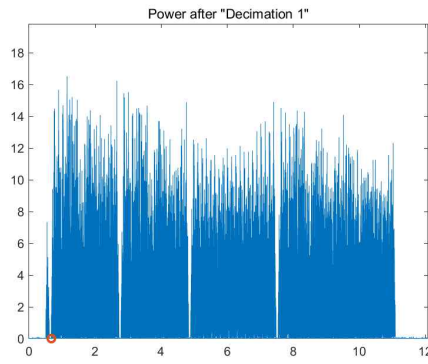
Fig. 29는 수신 신호의 프레임 동기 결과를 보여준다.



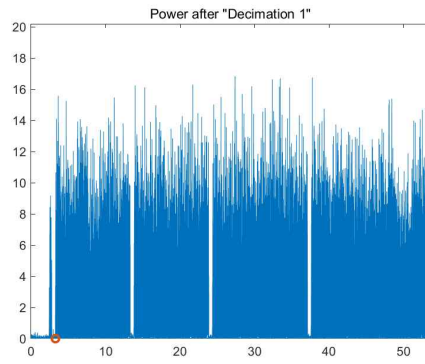
(a) 32km, 200bps



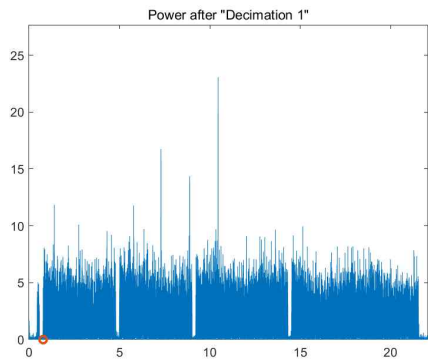
(b) 32km, 500bps



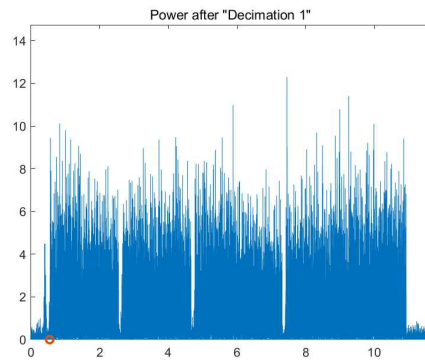
(c) 32km, 1000bps



(d) 67km, 200bps



(e) 67km, 500bps

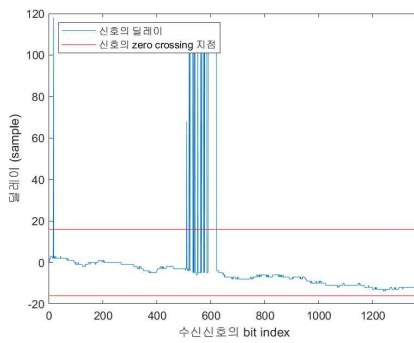


(e) 67km, 1000bps

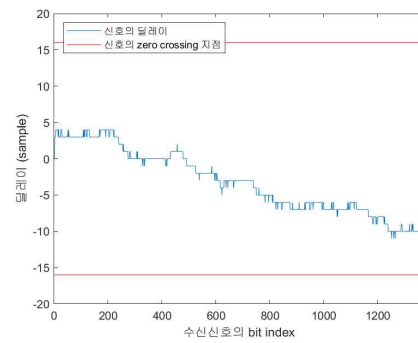
Fig. 29 Frame synchronization result

### 4.2.3 심볼 타이밍 동기 결과

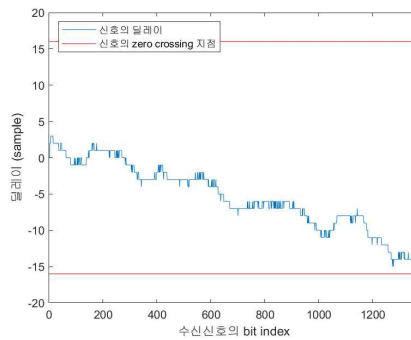
Fig. 30은 송수신기 거리가 32km인 경우의 상관을 이용한 딜레이 결과를 보여 준다. 그림 (a)에서 100샘플의 샘플 딜레이가 생기는 현상을 확인할 수 있는데, 이는 최고 상관 값과 비슷한 크기의 멀티패스가 상관을 취하면서 최고 상관 값과 값이 역전이 되는 현상으로 인해 발생한다.



(a) 32km, 200bps



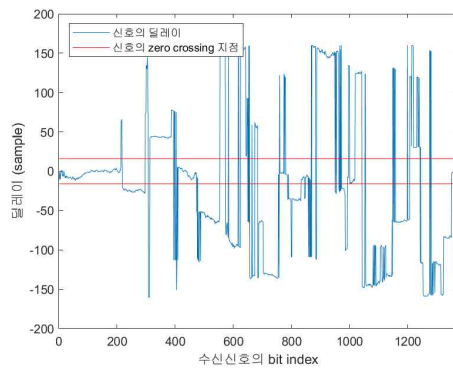
(b) 32km, 500bps



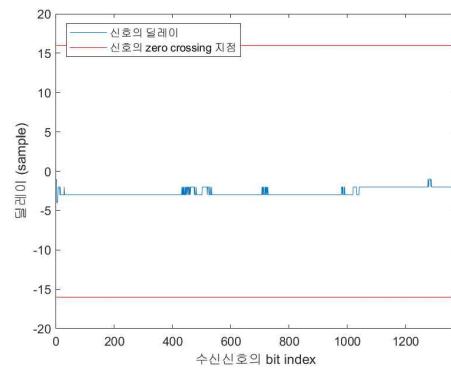
(c) 32km, 1000bps

Fig. 30 Correlation delay result (32km)

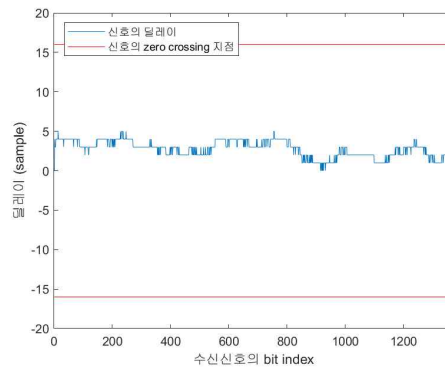
Fig. 31은 송수신기 거리가 67km인 경우의 상관을 이용한 딜레이 결과를 보여 준다. 그림 (a)에서 최고 상관 값과 비슷한 크기의 멀티패스로 인해 딜레이가 크게 생기는 것을 확인할 수 있고, 처음 프레임 동기를 진행한 위치에서 마지막 데이터의 위치까지 시간 지연이 크지 않아 5샘플의 딜레이가 발생하는 것을 볼 수 있다.



(a) 67km, 200bps



(b) 67km, 500bps



(c) 67km, 1000bps

Fig. 31 Correlation delay result (67km)

Fig. 32과 Fig. 33, Fig. 34는 송수신기 거리가 32km이고 각각 비트 전송 속도가 200, 500, 1000인 경우의 STR 결과를 보여준다. (a)는 STR의 TED, (b)는 STR의 LF, (c)는 STR의 NCO, (d)는 STR의 시간 지연을 보정한 데이터의 BER 결과를 보여준다. Fig. 32의 경우  $-1 \sim +20$  샘플의 시간 지연이 발생하였고 (d) 그림에서 프리앰블 초반에만 비트 에러가 발생하고 프리앰블 이후에는 BER이 0임을 확인할 수 있다. Fig. 33에서는  $-5 \sim +13$  샘플의 시간 지연이 발생하였고, (d) 그림에서 프리앰블과 데이터 초반에서 비트 에러가 점점 감소하다가 이후에는 비트 에러가 중간에 하나 보이는 것을 확인할 수 있다. Fig. 34에서는  $-5 \sim +13$  샘플의 시간 지연이 발생하였고, (d) 그림에서 비트 에러가 매우 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다.

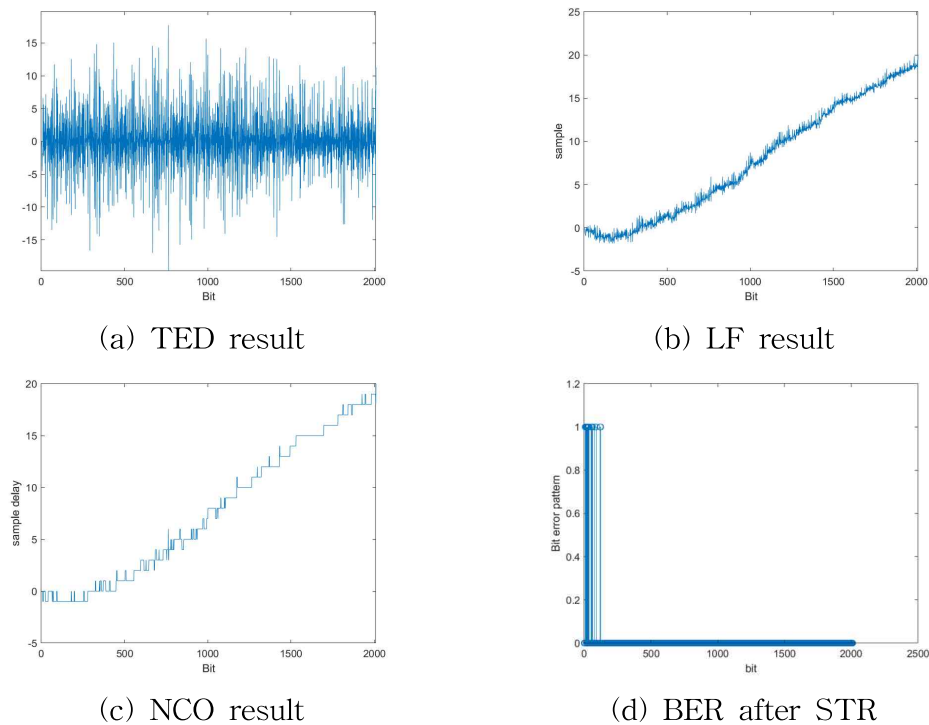
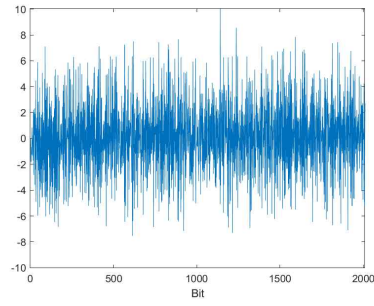
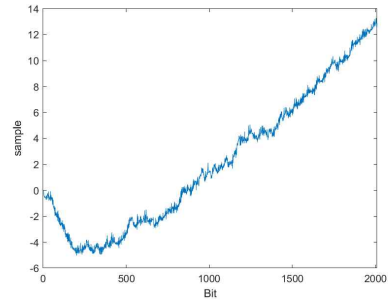


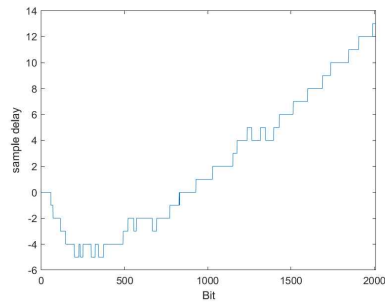
Fig. 32 STR result (32km, 200bps)



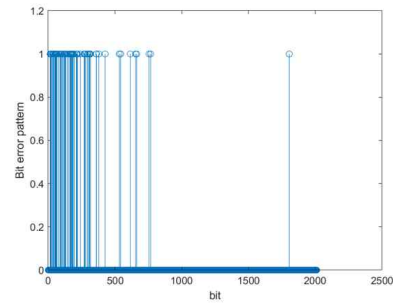
(a) TED result



(b) LF result

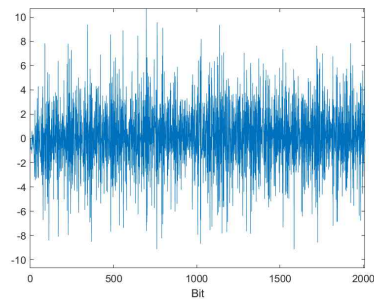


(c) NCO result

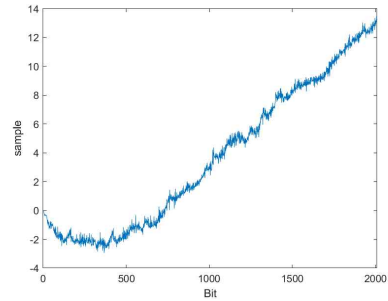


(d) BER after STR

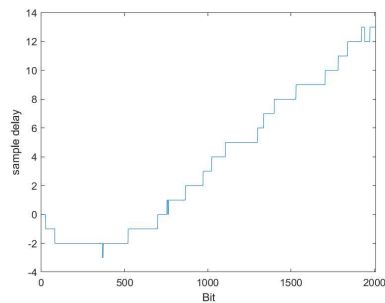
Fig. 33 STR result (32km, 500bps)



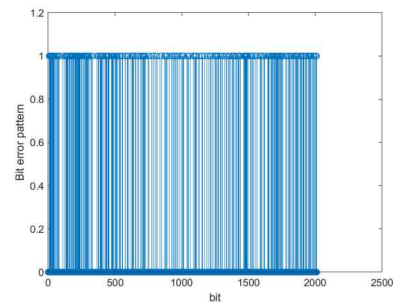
(a) TED result



(b) LF result



(c) NCO result



(d) BER after STR

Fig. 34 STR result (32km, 1000bps)

Fig. 35, Fig. 36, Fig. 37은 송수신기 거리가 67km이고 각각 비트 전송 속도가 200, 500, 1000인 경우의 STR 결과를 보여준다. (a)는 STR의 TED, (b)는 STR의 LF, (c)는 STR의 NCO, (d)는 STR의 시간 지연을 보정한 데이터의 BER 결과를 보여준다. Fig. 35의 경우 시간 지연이 발생하지 않았다. (d) 그림에서 BER이 매우 크게 나오는 것을 확인할 수 있다. 이는 STR의 Filter gain이 최적화가 되지 않았다고 판단된다. Fig. 36에서는 0 ~ +3 샘플의 시간 지연이 발생하였고, (d) 그림에서 비트 에러가 프리앰블과 데이터 구간 모두 발생하지 않은 것을 확인할 수 있다. Fig. 37에서는 -1 ~ 0 샘플의 시간 지연이 발생하였고, (d) 그림에서 프리앰블 초반과 데이터 구간 중간에 약간의 비트 에러가 발생함을 확인할 수 있다.

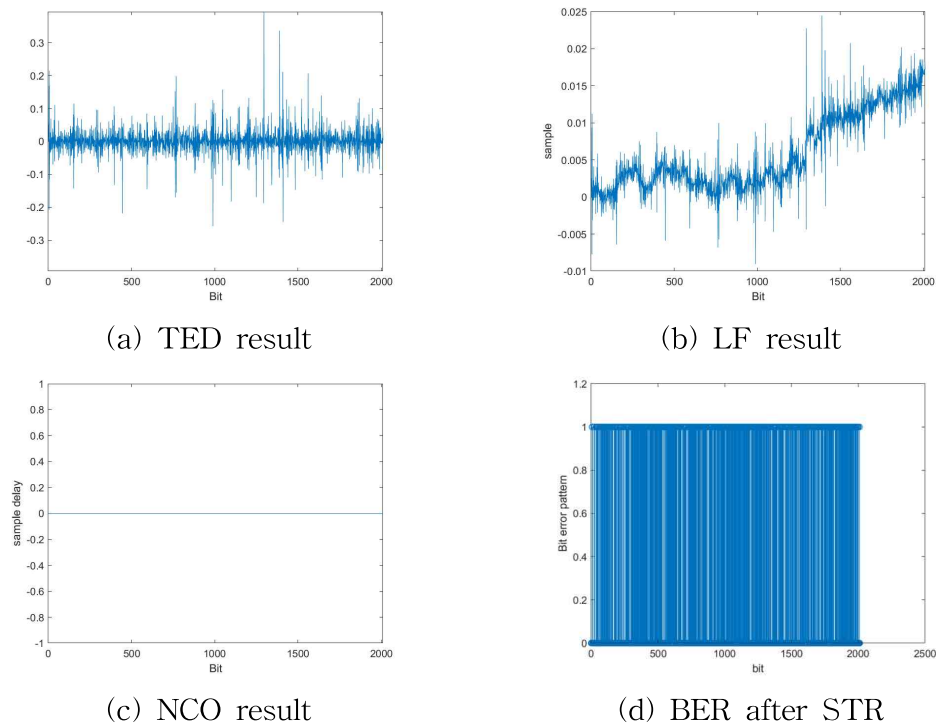


Fig. 35 STR result (67km, 200bps)



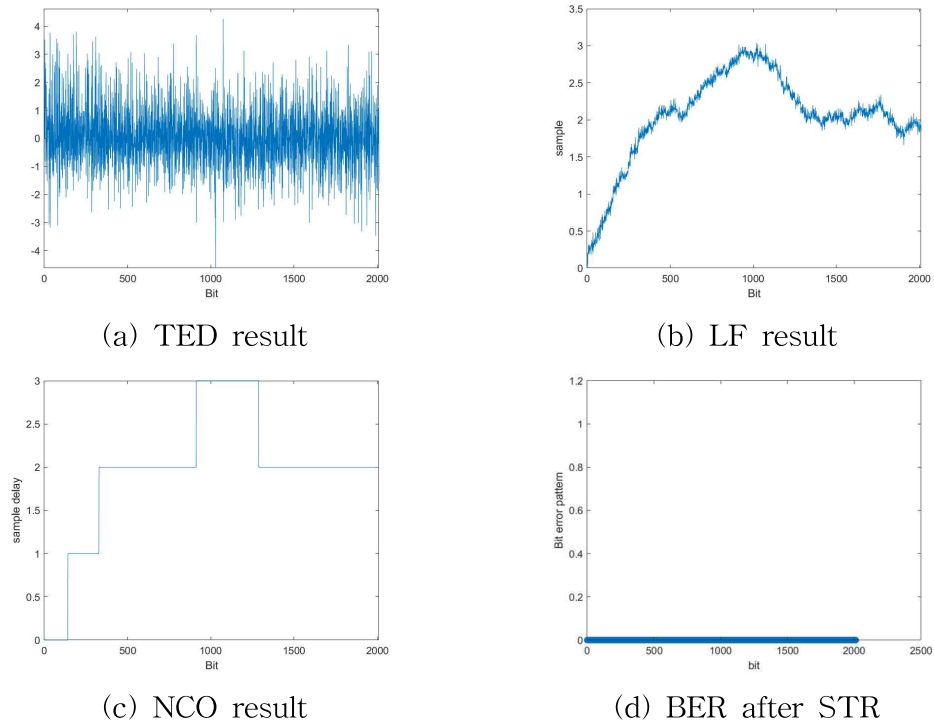


Fig. 36 STR result (67km, 500bps)

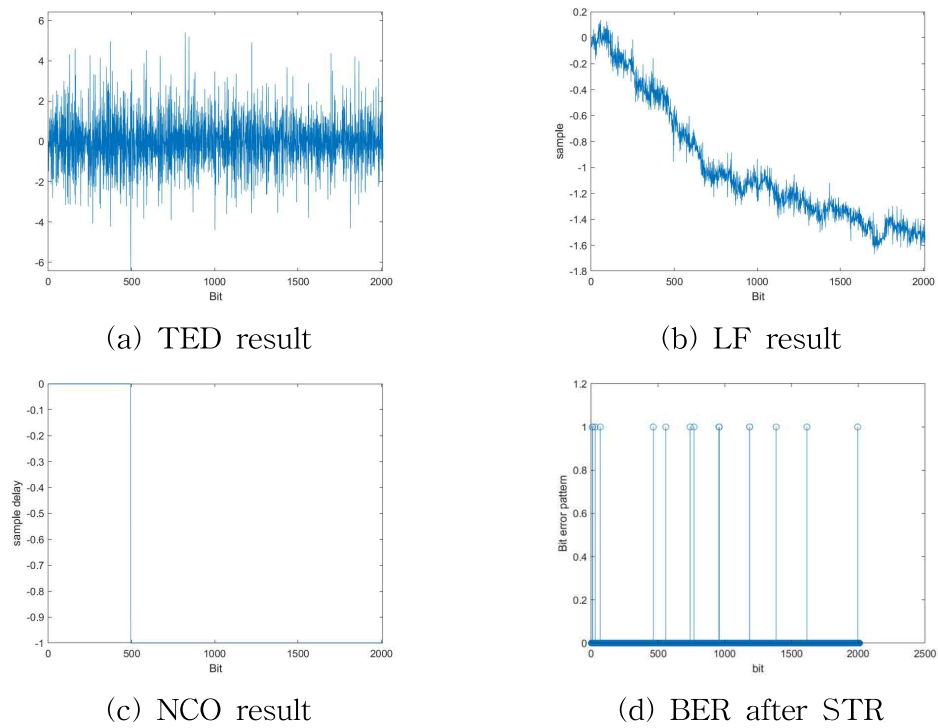


Fig. 37 STR result (67km, 1000bps)

Table 4는 2022년 해상실험 8번 채널의 시간 지연 보상 결과 후의 BER을 보여준다. 이때 BER은 랜덤 데이터 구간의 BER을 나타낸다.

Table 4 2022 underwater acoustic experiment BER result (ch8)

Length	32km		67km		
	1st	2nd	1st	2nd	3rd
100bps	0.32	0.03	0	0	0.01
200bps	0	0	0.01	0.48	0.01
500bps	0.11	0.41	0.03	0	0.06
1000bps	0.11	0.66	0.09	0	0.45

32km 송신 신호의 첫번째 100bps, 두번째 500bps, 1000bps와 67km의 송신 신호의 두번째 200bps, 세번째 1000bps를 제외하고는 BER이 대부분 0~0.1에 가까운 값인 것을 확인할 수 있다.

## 제 5 장 결론

수중 음향 통신에서 채널 특성의 변화, 해수면의 변동성, 송수신기의 이동성으로 발생하는 도플러 현상과 시간 지연 등이 발생한다. 이와 같은 현상들로 인해 수신 신호를 바로 복조해서 사용할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 데이터의 버스트 에러를 제거하기 위해 우선 정확한 프레임의 시작지점을 확인하고 시간 지연으로 발생하는 심볼 타이밍 동기를 보상하기 위한 수신기를 연구하고 시뮬레이션과 해상실험을 통해 성능을 검증하였다. 신호는 Probe, Guard Interval, Preamble, Data로 구성하여 Probe와 Preamble로 두 번의 상관을 거쳐 프레임 동기를 진행한다. 이러한 방식은 신뢰성 있고, 정확성이 높은 프레임 동기를 진행할 수 있다. 프레임 동기는 크게 상관기 방식과 FFT 방식 두가지를 이용하고, 프레임 동기 이후에는 Gardner 방식의 타이밍 에러 검출기를 이용한 심볼 단위 시간 지연을 보상하는 심볼 타이밍 동기를 진행한다. 송수신기의 이동성 등으로 발생하는 도플러 현상으로 발생하는 주파수 오차로 인해 동기 방식 상관 알고리즘을 바로 사용할 수 없다. 따라서 프레임 동기는 총 2-STEP으로 진행된다.

STEP 1에서는 주파수 오차가 있어도 최대 상관 값을 확인할 수 있는 비동기 방식 상관 알고리즘과 Sliding FFT 알고리즘을 통해 시간 축에서는 대략적인 프레임의 시작지점을 탐색하고, 주파수 축에서는 초기 도플러 주파수를 추정하였다. 이때 일반적인 FFT 알고리즘을 사용하는 경우에는 데이터 전송 속도가 높아지면 주파수 해상도(Frequency resolution)가 감소하는 현상이 발생한다. 시뮬레이션을 통해 주파수 해상도가 감소하게 되면 정확한 초기 도플러 주파수를 추정할 수 없음을 확인하였고, 동기 방식 상관으로 최대 상관 값을 확인할 수 없는 경우가 발생한다. 따라서 FFT 하고자 하는 신호에 Zero 값을 추가하여 FFT를 수행하는 Zero padding 방식을 이용하여 데이터 전송 속도가 높아지더라도 정확한 초기 도플러 주파수를 추정할 수 있다.

비동기 방식 상관 알고리즘과 Sliding FFT 알고리즘을 통해 확인한 초기 도플러 주파수를 보정한 수신 신호를 이용하여 대략적인 프레임의 시작지점을 기준으로 STEP 2에서는 동기 방식 상관 알고리즘을 이용하여 정확한 프레임의 시작

지점을 확인한다.

프레임 동기가 완료된 이후에는 심볼 단위 이내의 시간 지연을 Gardner 방식의 STR(Symbol Timing Recovery)을 이용하여 검출 및 보정하게 하였다. Gardner 방식의 STR은 심볼 단위로 동작하였으며, 32 samples/symbol의 미세 타이밍 조절이 가능하다는 것을 확인하였다.

본 논문에서는 두 번의 해상실험을 통해 프레임 동기 알고리즘과 심볼 타이밍 동기 알고리즘의 성능을 확인하였다. 2020년 해상실험에서 프레임 동기 알고리즘을 우선 확인하였고, 데이터의 에러 개수와 BER을 통해 프레임 동기 알고리즘만으로는 신호의 타이밍 동기가 어려운 것을 확인하였다. 이후 데이터의 상관을 통해 심볼 단위 시간 지연이 발생함을 확인하였다. 2022년 해상실험에서는 프레임 동기 알고리즘과 심볼 타이밍 동기 알고리즘을 모두 적용시켜 타이밍 동기를 진행했고, 심볼 타이밍 동기 알고리즘을 적용한 이후 대부분의 결과에서 BER이 좋아지는 결과를 확인하였다. 향후에는 BPSK 변조방식에 이어서 QPSK, 대역확산 변조방식 수신 신호의 타이밍 동기에 대한 연구가 필요하다.

## 참고문헌

- [1] 최지웅, 김선효, 순수욱, 김시문, “해양환경 변동에 따른 수중음향 무선통신 채널 특성”, 한국통신학회지(정보와통신), 33(8), pp.52-62, 2016
- [2] 백창욱, 정지원, “수중음향통신에서 PN 성능 기반의 효율적인 수신 구조”, 한국항해항만학회지, vol.41, pp.173-180, 2017
- [3] 김세영, 한정우, 김기만, “수중 센서네트워크 구현을 위한 단일 반송파 디지털 변조기법의 실험적 고찰”, 한국정보통신학회논문지, 2011
- [4] Z. Y. Choi, “Baseband digital frequency offset mitigation techniques for the detection and frame synchronization of M-PSK signals,” Ph.D. dissertation, KAIST, June.
- [5] M. Stojanovic, J.A. Catipovic, J.G. Proakis, “Phase-coherent digital communications for underwater acoustic channels”, IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol.19, pp.100-111, 1994
- [6] Milica Stojanovic, James Preisig, “Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization”, IEEE Communications Magazine, vol.47, pp.84-89, 2009
- [7] JAMES L. MASSEY, “Optimum Frame Synchronization”, IEEE Transactions on Communications, Vol.20, pp.115-119, 1972
- [8] M. Stojanovic, “Underwater acoustic communications,” Proc. Electro/International, 1-32 (1995).
- [9] 최형진, 동기방식 디지털 통신, (주) 교학사, 1995.
- [10] M. Chiani, “Noncoherent frame synchronization,” IEEE Trans. on Comm. 58, 1536-1545 (2010).
- [11] E. Jacobsen and R. Lyons, “The sliding DFT,” IEEE Signal Process. Mag. 20, 74-80 (2003).
- [12] F. Gardner, “A BPSK/QPSK Timing-Error Detector for Sampled Receivers”, IEEE Transactions on Communications, vol.34, pp.423-429, 1986
- [15] Dongmin Lim, “A Modified Gardner Detector for Symbol Timing Recovery of M-PSK Signals,” IEEE Transactions on Communications, vol.52, pp.1643-1647, 2004
- [14] T. Manabe, H. Takai, “Superresolution of multipath delay profiles measured by

PN correlation method”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.40, pp.500-509, 1992

[16] S. Ko and W. J. Kim, “Robust frame synchronization algorithm in time-varying underwater acoustic communication channel” (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. 39, 8-15 (2020).

[17] YANG, Gyeong-pil, KIM, Wan-Jin, DO, Dae-Won, KO, Seokjun, “A method of frame synchronization of binary phase shift keying signal in underwater acoustic communications”, The Journal of the Acoustical Society of Korea, vol.41, pp.159-165, 2022