

工學碩士 學位請求論文

수중 센서 네트워크 시스템을 위한 통신용 모뎀  
설계 및 구현

A Communication Modem Design & Implementation  
for the Underwater Sensor Network System

指導教授 金 基 萬

2007年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電 波 工 學 科

全 裁 局

# 차 례

제 1 장 서 론.....	1
제 2 장 수중 센서 네트워크 시스템 개요.....	5
제 2-1 절 기존의 연구 동향 및 수중 센서 네트워크 통신 구조..	5
2-1-1. 기존의 연구 동향.....	5
2-1-2. 수중 센서 네트워크의 통신 구조.....	7
제 2-2 절 시스템 개요.....	9
제 3 장 시스템 구현.....	12
제 3-1 절 송 · 수신기 구조.....	12
제 3-2 절 시스템 구현 및 최적화.....	17
제 4 장 시스템 성능 검증.....	27
제 5 장 결 론.....	41
참고문헌.....	43

## 그림 차례

- 그림 1-1 실세계와 사이버 세계와의 관계
- 그림 2-1 광역 센서 노드 군집 형태
- 그림 2-2 지역 센서 노드 군집 형태
- 그림 2-3 수중 네트워크 시스템의 전체적인 형상도
- 그림 2-4 단일의 광역 센서 지역의 내부 형상도
- 그림 3-1 송·수신기 알고리즘 블록도
- 그림 3-2 정합 필터 블록
- 그림 3-3 알고리즘 흐름도
- 그림 3-5 DSP 프로세서 모듈
- 그림 3-6 DSP STAR 개발보드
- 그림 3-7 이론적인 알고리즘에 치중하여 구현한 경우
- 그림 3-8 최적화 과정을 통하여 구현한 경우
- 그림 3-9 DSP 프로세서 내부 블록도
- 그림 3-10 McBSP와 DSP core간의 통신 블록도
- 그림 3-11 EDMA를 이용한 최적화 과정 블록도
- 그림 4-1 실험에 사용된 수조의 규격도
- 그림 4-2 원본 데이터 신호
- 그림 4-3 BPSK 변조된 신호
- 그림 4-4 이상적 환경에서 BPSK 신호 성상도
- 그림 4-5 이상적 환경에서 BPSK 신호 실측 파형
- 그림 4-6 이상적 환경에서 복원 신호
- 그림 4-7 유선환경에서 입력된 전송 신호(3 sample delay)

그림 4-8 Energy detection block을 통해 보정된 신호

그림 4-9 유선환경에서 BPSK 신호 정상도

그림 4-10 유선환경에서 복원 신호

그림 4-11 수조환경에서 입력된 전송신호(data rate 125sps, carrier 2/4KHz)

그림 4-12 수조환경에서 BPSK 신호 정상도(data rate 125sps, carrier 2/4KHz)

그림 4-13 수조환경에서 복원 신호(data rate 125sps, carrier 2/4KHz)

그림 4-14 수조환경에서 입력된 전송신호(data rate 250sps, carrier 2/4KHz)

그림 4-15 수조환경에서 BPSK 신호 정상도(data rate 250sps, carrier 2/4KHz)

그림 4-16 수조환경에서 복원 신호(data rate 250sps, carrier 2/4KHz)

그림 4-17 전송률에 따른 전송 비트 오류 확률

## 표 차 례

표 3-1 광역 센서 보드 특징

표 3-2 시스템 제원

표 4-1 성능 실험 제원

## 기 호 표

$S_{PSK}$	BPSK 변조된 신호
$S_{PSK}(t) + n(t)$	잡음성분이 더해진 BPSK 변조된 신호
$Z_i(t)$	정합 필터를 통과한 신호
$a_i(t)$	반송파가 제거된 신호
$n_0(t)$	잡음 신호

## 약 어 표

A/D	Analog to Digital
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BPSK	Binary Phase Shift Keying
D/A	Digital to Analog
DBPSK	Differential Binary Phase Shift Keying
DSP	Digital Signal Processing
EDMA	Enhanced Direct Memory Access
GUI	Graphic User Interface
McBSP	Multi Channel Buffered Serial Port
NRZ	Non Return to Zero
PCM	Pulse Codede Modulation
SNR	Signal to Noise Ratio
SSB	Single Side Band
USN	Undewater Sensor Network

## *ABSTRACT*

Underwater sensor nodes will find applications in oceanographic data collection, pollution monitoring, offshore exploration, disaster prevention, assisted navigation and tactical surveillance applications. Moreover, unmanned or autonomous underwater vehicles (UUVs, AUVs), equipped with sensors, will enable the exploration of natural undersea resources and gathering of scientific data in collaborative monitoring missions. Underwater acoustic networking is the enabling technology for these applications. Underwater networks consist of a variable number of sensors and vehicles that are deployed to perform collaborative monitoring tasks over a given area. Underwater acoustic communication have received much attention as their applications, have begun to shift from military toward commercial. The growing interest in underwater acoustic communications come as a response to the rapidly growing needs for wireless underwater communications, brought in part by the broadening of applications, such as military and commercial ones. Commercial applications which have received much attention lately are pollution monitoring in environmental systems, remote control in off-shore oil industry, and collection of scientific data recorded at benthic station without the need for retrieving the instruments. Many developing applications include of commercial and military are now calling for real-time communication with submarines and autonomous underwater vehicles, not only in point-to-point links, but also in network configurations.

In this thesis, several fundamental key aspects of underwater acoustic communications are investigated. Different architectures for global and local communication modem for underwater sensor networks are discussed, and the characteristics of the underwater communication modem is detailed. The main challenges for the development of efficient networking solutions posed by the underwater environment are detailed and a cross-layer approach to the integration of all communication functionalities is suggested. The performance of a digital baseband signal processing and data transmission rate depends on the modulation technique. Communication modem for Underwater sensor network is implemented using by DBPSK modem technique. In order to



implement underwater sensor network modem, SNR detection block is suggested. SNR detection block has the reference SNR value that selects between base mode and additive user mode. In this thesis, suggested system is based on software interface and all Hardware(PLL, modem, filter, equalizer etc) is implemented by software, exclusive of DSP, A/D, D/A converter, SDRAM and Flash memory.

# 제 1 장 서 론

유비쿼터스 컴퓨팅이란 소형 컴퓨터를 여기 저기 배치시켜 우리의 일상 생활을 효율적으로, 편리하게 유지, 관리하는 것이다. 그림 1-1에서 실세계에는 실생활공간과 실사용자가 존재한다. 이 실세계의 현 상태를 Ubiquitous Sensor Network을 이용하여 사이버세계의 사이버도시나 사이버사용자에게 사상한다. 실사용자는 기존의 인터넷 등의 유선망 및 Wibro, CDMA, 텔레매틱스 등의 무선접근망을 이용하여 언제, 어디서나 사이버 사용자로 접속할 수 있다.

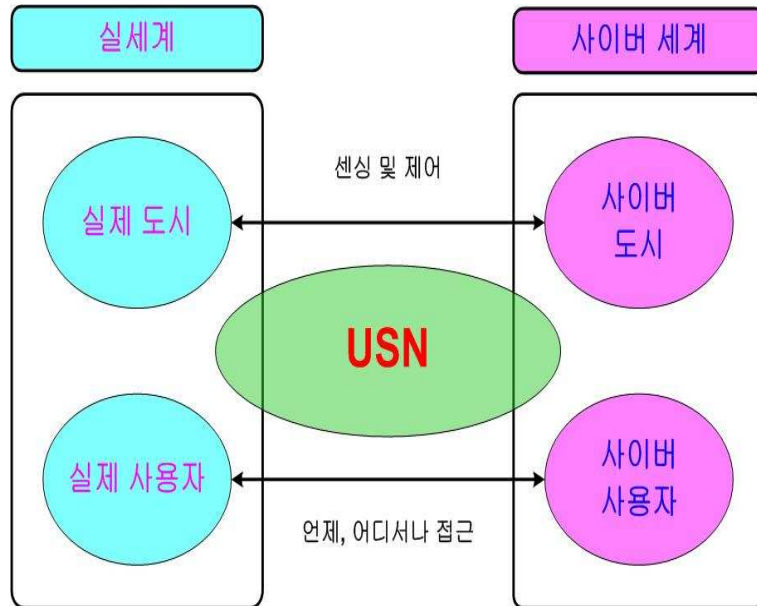


그림 1-1. 실세계와 사이버 세계와의 관계

사이버 세계에서 판단이나 결정이 센서 네트워크를 거쳐 실세계의 상태 변화에 반영된다. 그림 1-1 처럼 센서 네트워크는 유비쿼터스 사회에서 실세계와 사이버 세계와의 상태 변이를 상호 전달하는 중요한 역할을 수행한다.

USN 기술은 지능형 빌딩내의 환경 컨트롤, 생산공정 자동제어, 창고 물류관리, 병원에서의 물품/정보 관리 및 환자상태 원격감지, 지능형 교통시스템, 텔레매틱스 등 그 응용범위가 광범위하기 때문에 유비쿼터스 무선망의 핵심으로 활발한 연구가 진행되고 있다[1][2].

본 논문에서 우리는 이러한 USN 시스템의 특징을 활용하여, 수중 통신 시스템을 접목시켜, 광범위한 해양환경 모니터링 시스템의 기본적인 모델을 구현해 볼 것이다. 수중 통신 시스템은 과거 군사적 목적을 위해 제한적으로 사용되었다. 수중 음원 탐지나 수중 운동체 추적, 잠수함등과의 통신을 위해 주로 연구되었으나 해양에 관한 관심이 고조되고, 해양 탐사나 해저 자원 탐사가 활발해지면서 그 활용분야가 확대되었다. 하지만 국내의 기술 수준은 해양산업기술의 수요 부족으로 인하여 수중 통신 시스템의 개발은 미미한 수준이다. 현재 수중에서의 유선통신은 많은 연구가 진행되고 있으며, 광케이블을 이용한 고속 통신과 같은 연구가 진행되고 있다. 수중에서 전파는 급격한 감쇠특성을 갖기 때문에 수중에서의 무선통신에는 음파를 이용하여 통신을 하게 된다. 이러한 이유로 수중에서의 무선 통신 시스템 연구는 수중음향학과 통신기술의 복합기술로 연구가 이루어지는 분야이다[3~7].

수중 무선 통신은 2차대전시 Single Side Band(SSB)방식의 수중 전화기가 개발된 이래 다양한 수중 전화기가 민군 겸용으로 개발되었다. 미국의 Woods Hole Oceanographic Institution(WHOI)에서는 휴대폰망과 유사한 수중 음향 통신망을 구축하려는 연구를 수행하였고, 프랑스의 THOMSON Sintra사에서는 적응 빔형성 기술을 이용한 고속 수중 통신 기술의 개발, 미국의 Northeastern 대학의 수중 영상자료 전송을 위한 웨이브렛 기반 압축 알고리즘 개발, 기타 대역확산 기법(Spread

Spectrum)을 이용한 수중 정보통신의 보안에 관한 연구등 민간 연구기관 주도의 많은 연구 활동이 있었다[8~11].

무인 수중 잠수정이나 수중환경 감시용 측정 장비들은 무선을 이용한 제어가 이루어지는 것으로 이들은 측정 자료를 해상의 모선에 전송하는 수동적, 양방향통신 시스템이다. 따라서 자신의 위치제어 신호나 측정자료 전송들은 모선과의 통신에 의해 이루어지는 것으로 잠수정에서 측정된 화상자료 등은 저전력 고속전송이 요구되며, 해면, 해저에 의한 다중경로에 의해 수중 통신 시스템의 성능이 일차적으로 좌우된다. 따라서 수중 무선 통신에서는 다중경로와 좁은 대역폭으로 인해 데이터 전송률이 현저히 떨어지게 되는 현상이 나타나게 된다[12][13].

수중통신에서 사용하는 주파수는 대부분 가용한 주파수 대역폭이 매우 협소한 특징을 가지고 있으며, 많은 대역폭을 필요로 하는 디지털 데이터를 전송하기 위해서는 효율적인 전송방법이 필요하다. 또한 다중경로 채널 특성을 가지기 때문에 이를 추정하여 적응적으로 대처할 수 있는 기법들이 필요하다. 이러한 종전의 디지털 전송기법 및 채널적응 알고리즘 등은 대부분 이론적인 측면에서의 시뮬레이션을 기반으로 하여 많은 부분을 정확도에 초점을 맞추고 제안되어져 왔다[14][15]. 이는 높은 복잡도와 수학적 연산량이 많아 알고리즘의 실시간 구현에 많은 어려움이 따르게 되며, 값비싼 고성능 프로세서를 필요로 하기 때문에 실제로 구현하기가 어렵다[16~21].

본 논문에서는 제안된 알고리즘을 시스템에 최적화하여 실시간으로 처리하기 위해서 센서부에 해당하는 송신기는 소프트웨어적으로 수정이 가능한 AVR 프로세서를 사용하여, 원본 신호에 해당하는 디지털 정보를 PCM(Pulse Coded Modulation) 기법으로 과형 변조하여, 프리앰블 신호

를 사용하지 않고, 원본 데이터 신호를 직접 변조하는 D-BPSK (Differential Binary Phase Shift Keying) 방법으로 구현하였으며, 수신기에서는 수중채널 특성에 적응하기 위해 SNR 검출 및 D-BPSK 방식을 사용하는 상관 수신기(Matched filter), 보간기, 등화기 등의 DSP 알고리즘을 사용하여 수신 신호를 복원할 수 있도록 구현하였다. 또한 본 논문의 시스템을 실시간 전송 및 디버깅을 하기 위하여 제안된 DSP 알고리즘의 블록을 독립적으로 구현하여, 상황 변화에 따라 스위칭 방식으로 시스템에 적용되도록 구현하였으며, 이에 대한 성능은 센서네트워크용으로 자체 제작한 AVR ATmega8535프로세서가 탑재된 송신보드와 수신 시스템에 사용된 TMS320C6711 프로세서가 탑재된 DSP 보드를 통해 검증하였다.

## 제 2 장 수중 센서 네트워크 시스템 개요

### 제 2-1 절 기존의 연구 동향 및 수중 센서 네트워크 통신 구조

#### 2-1-1. 기존의 연구 동향

제2차 세계대전 이후로 수중 센서 네트워크의 연구는 주로 30~300Hz 대역의 매우 낮은 통신 주파수를 사용하여 왔다. 이는 수중 센서 통신 네트워크의 가장 널리 알려진 모델중 하나인 U.C Berkeley Mica 2 Motes 모델을 통해 알 수 있듯이 낮은 주파수 사용으로 인한 데이터 전송 대역폭 제한과 높은 송신 전력 등의 문제로 인해, 아래와 같은 문제점을 동반하게 된다[1][2].

- No real-time monitoring
- No on-line system reconfiguration
- No failure detection
- Limited storage capacity

이러한 문제를 해결하기 위해, 기존의 주요 연구 변화 추이는 가용 대역폭 문제, 수중 환경 하에서의 전파 지연 문제, 높은 전송 에러와 손실 복원 및 전력 보완 문제 등을 다뤄왔다.

수중 센서 네트워크와 관련된 주요 연구 동향은 아래와 같다.

#### ▶ 외국의 경우

- 1 Transport layer : 수중에서는 large propagation delay 때문에 Transmission Control Protocol 과 같은 end-to-end 접근이 어

려우므로 대안으로써 FEC-based hop-by-hop approach with infrequent ACKs를 연구 중이다.

- 1 Network layer : 현재 지상의 WSN과 ad-hoc network의 routing 방법을 바탕으로 수중 환경에 적합한 efficient multi-hop data routing을 연구 중이다. 그 예로, 현재 location-based routing인 Vector-based Forwarding 연구가 활발히 이루어지고 있다.
- 1 Datalink layer : 수중 환경에 적합한 MAC Protocol 에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 특히, cluster 구조를 이용하여 cluster 간에는 CDMA를 이용하고 cluster 내에서는 TDMA를 사용하는 방법에 대해 연구 중에 있다. 그리고 최근 RTS/CTS를 이용하여 수중환경에 맞게 변경한 RTS/CTS에 관한 연구도 이루어지고 있다.

▶ 국내의 경우

- 1 지상의 WSN 및 ad-hoc을 기반으로 수중환경에 맞게 UWSN의 기본적인 이론 연구 수준에 있다.

▶ 개발되었거나 개발 중인 새로운 기술

- 1 Connecticut 대학에서 진행 중인 FRONT (Seaweb) 프로젝트는 수중 센서에 미 해군에서 개발된 telesonar라는 모뎀기술을 채택하여 acoustic telemetry와 ranging advances 기술을 이용한 UWSN를 연구 중이다.
- 1 현재 AUVs (Autonomous Underwater Vehicles)에 대한 연구가

많이 이루어지고 있는데, AUVs와 docking system의 docking station에 관한 control software, hardware가 개발되었고 성능 향상을 위한 연구 중에 있다.

### 2-1-2. 수중 센서 네트워크의 통신 구조

수중 센서 네트워크의 통신구조는 크게 두 가지로 나누어 생각할 수 있는데, 첫 번째 형태는 아래 그림 2-3과 같이 해면에 위치한 중계 기지를 기준으로 지상과 수중을 연결 해줄과 동시에 수중에 있는 각 광역 센서 노드군과 연계하는 형태로 구성되어 있다[1~11].

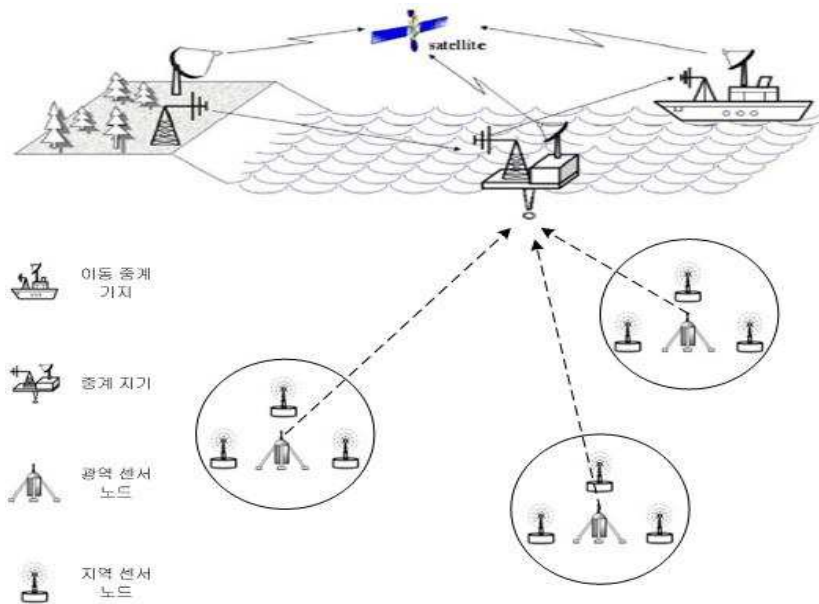


그림 2-1. 광역 센서 노드 군집 형태

위와 같은 형태는 하나의 광역 센서 지역 내에 다수의 지역 센서 노드가 구성된 형태로 광역 센서 노드와 중계 기지가 수집된 정보를 송·수신하는 방식으로 구성되어 있다. 반면에, 그림 2-2는 광역 센서 노드군



없이 지역 센서 노드가 직접 중계 기지와 통신하는 방식을 보인다.

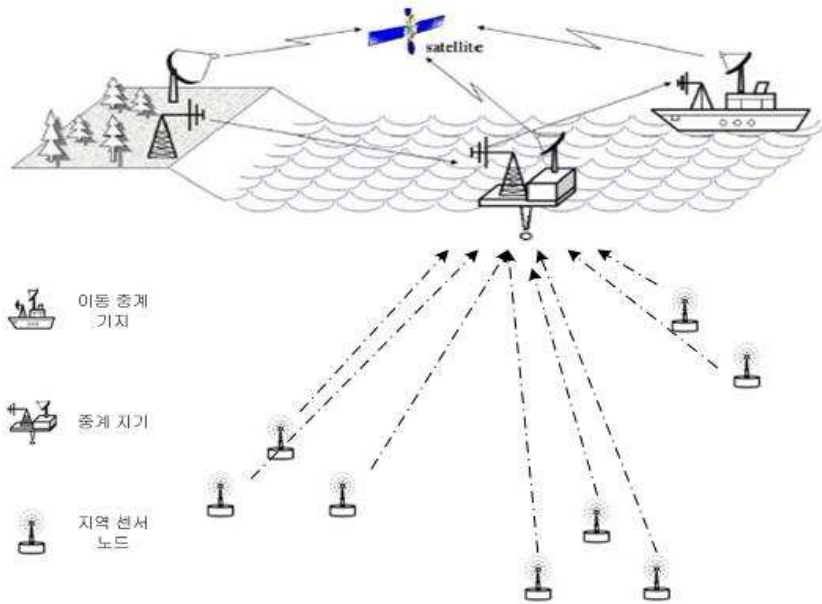


그림 2-2. 지역 센서 노드 군집 형태

이 두 구조의 경우, 각각의 장단점을 가지고 있는데, 먼저 센서 네트워크 범위는 광역 센서 노드 군에 비해 지역 센서 노드 군이 넓으나, 실제 중계 기지와 통신 범위는 광역 센서 노드 군이 보다 넓은 범위를 갖는다. 이는 송신 전력 측면으로 볼 때 광역 센서 노드 군이 보다 효율적인 전력 관리가 가능한 형태로 구성되어 있기 때문이다.

정보 수집 측면에서 살펴보면, 광역 센서 노드 군이 지역 센서 노드 군에 비해 비교적 정확하게 정보 수집이 가능하다. 이는 지역 센서 노드 군의 경우 중계 기지로부터 비교적 먼 거리에 있는 지역 센서 노드의 경우 송신 전력 등의 문제로 인해, 수집된 정보의 송신 신호가 중간에 소실 될 수도 있기 때문이다. 그러나, 지역 센서 노드 군의 경우 센서 네트

워크의 범위가 넓기 때문에 보다 다양하고 많은 정보를 수집 할 수 있다.

끝으로 통신 링크의 안정성 측면에서는 지역 센서 노드 군이 광역 센서 노드 군에 비해 보다 안정하다 할 수 있다. 광역 센서 노드 군의 경우 두 가지 경로로 통신 링크를 형성하게 되는데, 먼저 광역 센서 지역내의 지역 센서 노드와 수평으로 하나의 통신 링크를 형성하게 되고, 중계 기지와 수직적으로 통신 링크를 형성하게 된다. 이렇게 생성된 두 링크는 인접한 지역에 있는 광역 센서 노드 군에서 송신하는 신호와 간섭을 일으킬 뿐만 아니라 수중 채널 상에 보다 많은 신호원이 산재하게 되기 때문에, 신호 감쇄와 왜곡 및 다중경로에 의한 전파 지연, 채널 잡음 증가 등의 여러 문제점을 발생 시킨다. 반면에, 지역 센서 노드의 경우 중계 기지와 수직적으로 단일의 통신 링크만을 형성하기 때문에, 광역 센서 노드 군에 비해 안정적인 통신 링크를 형성 할 수 있다.

## 제 2-2 절 시스템 개요

본 논문에서 구현 하고자 하는 수중 센서 네트워크용 시스템은 앞서 2-1절에서 언급한 광역 센서 노드 군집 형태를 기본으로 하여 설계 되었으며, 전체적인 센서 네트워크의 형상도는 아래 그림 2-3과 같이 다수의 센서 노드들로 구성된 센서 필드를 통해 정보를 취득한 다음, 사용자가 필요한 정보를 실시간으로 얻을 수 있도록, 취득된 정보를 조합한 후 범용 네트워크로 전송하는 형태이다.

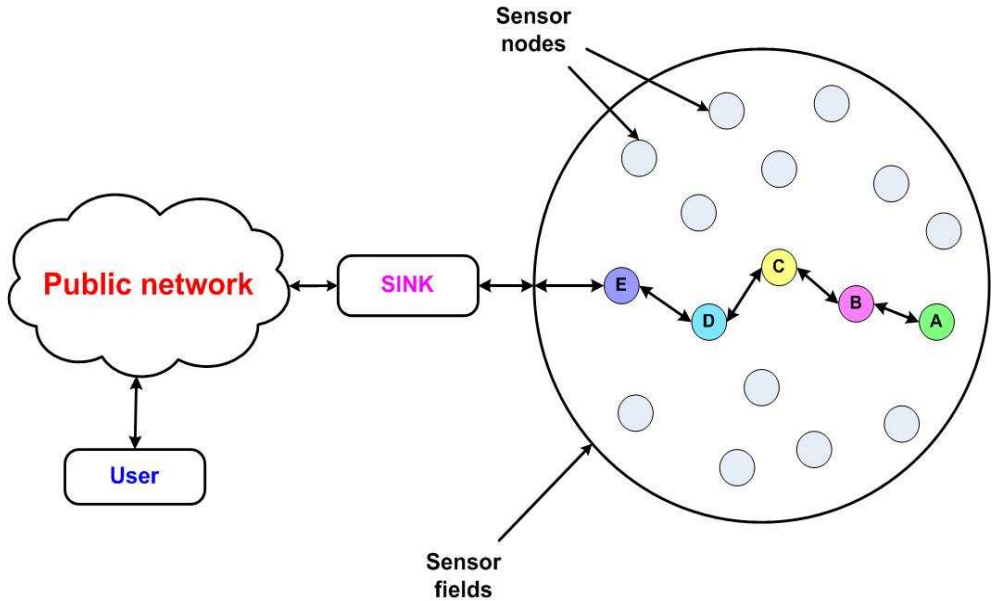


그림 2-3. 수중 네트워크 시스템의 전체적인 형상도

그러나 앞서 소개한 기존의 연구 모델의 통신 링크 상의 단점을 보완하기 위해 센서 필드 내부에서의 각 센서 노드들은 광역 센서 군집 내부에서의 통신과 외부에서의 통신으로 통신 방법상 두 가지를 다르게 하여 구성된다.

먼저, 전체적인 센서 네트워크 시스템의 구성을 살펴보면, 송신부만 가지고 있는 지역 센서 노드와 송·수신부를 함께 가지고 있는 광역 센서 노드 및 데이터 싱크를 맞추기 위한 중계 기지로 구성된다. 위 그림에서 보이고 있는 A,B,C,D,E 센서 노드들은 각각의 광역 센서 영역을 의미하며, 이 영역 내부에 하나의 광역 센서 노드와 다수의 지역 센서 노드들이 존재하게 된다. SINK 블록의 경우 중계 기지에 해당된다. 지역 센서 노드는 정보 수집용 센서와 1 채널의 송신기로 구성되어 있으며, 취득된 정보를 특별한 프리앰블 없이 통신 하는 방식인 차동 방식을 사용하여,

데이터가 있을 시에만 전송하는 버스트 기법으로 근거리에 있는 광역 센서 노드로 전송하는 역할을 수행한다. 반면에 광역 센서 노드는 M 채널의 수신부와 1 채널의 송신부로 구성되어 있으며, 지역 센서 노드들로부터 수신한 정보를 재조합하여 보다 먼 거리에 있는 중계 기지로 데이터를 전송 해줄 뿐만 아니라 인접한 광역 센서 노드로 데이터 전송 및 프리앰블과 같은 피아 식별 신호를 전송 해주는 역할을 수행하도록 구성되어 있다.

이후 본 논문에서는 시스템의 초기 단계로 시스템 설계 및 구현 부분에서 소개할 내용은 그림 2-4와 같이 단일의 광역 센서 지역 내부의 지역 센서 노드와 광역 센서 노드로 단일 채널 환경으로 구성하였으며, 멀티 채널 환경은 향후 추진할 예정이다.

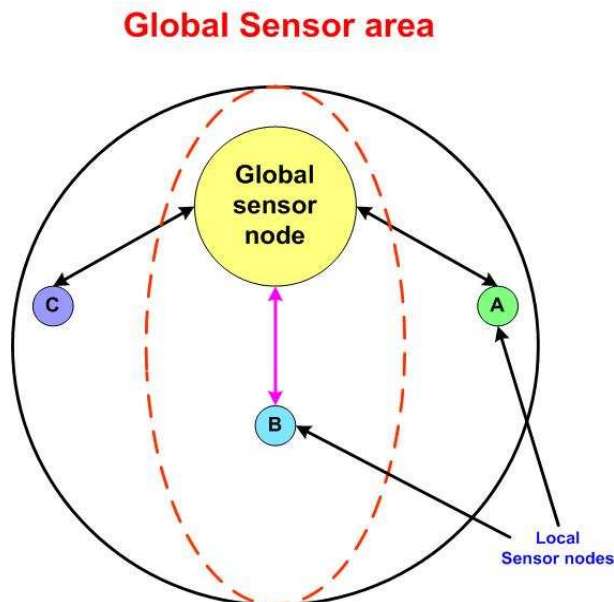


그림 2-4. 단일의 광역 센서 지역의 내부 형상도

## 제 3 장 시스템 구현

### 제 3-1 절 송 · 수신기 구조

본 논문에서 구현한 각 센서 노드의 수중 데이터 통신을 위한 D-BPSK 송수신 시스템의 블록도는 그림 3-1과 같으며, 여기서 사용된 Differential 기법은 종전의 일반적인 수중 통신 알고리즘에 비해 데이터 전송 효율과 실제 하드웨어에서의 처리 속도 측면에서는 우수하나, 환경적인 요인에 민감한 부분을 가지고 있어 다수의 신호 감쇄 요인들이 산재하는 곳에서는 성능이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점들이 있음에도 불구하고, 본 논문에서 이 기법을 채택한 이유는 많은 대역폭을 필요로 하는 디지털 데이터를 전송하기 위해서는 효율적인 전송방법이 필요하기 때문이다. 종전의 알고리즘들은 높은 복잡도와 수학적 연산량이 많아 시스템의 실시간 구현에 많은 어려움이 따랐으며, 값비싼 고성능 프로세서를 필요로 하기 때문에 실제로 구현하기가 어려웠다. 이에 따라 보다 적은 비용으로, 실시간 정보를 얻고자 하는 사용자들의 욕구 충족을 위해 실시간으로 동작하는 시스템을 구현하기 위해서이다.

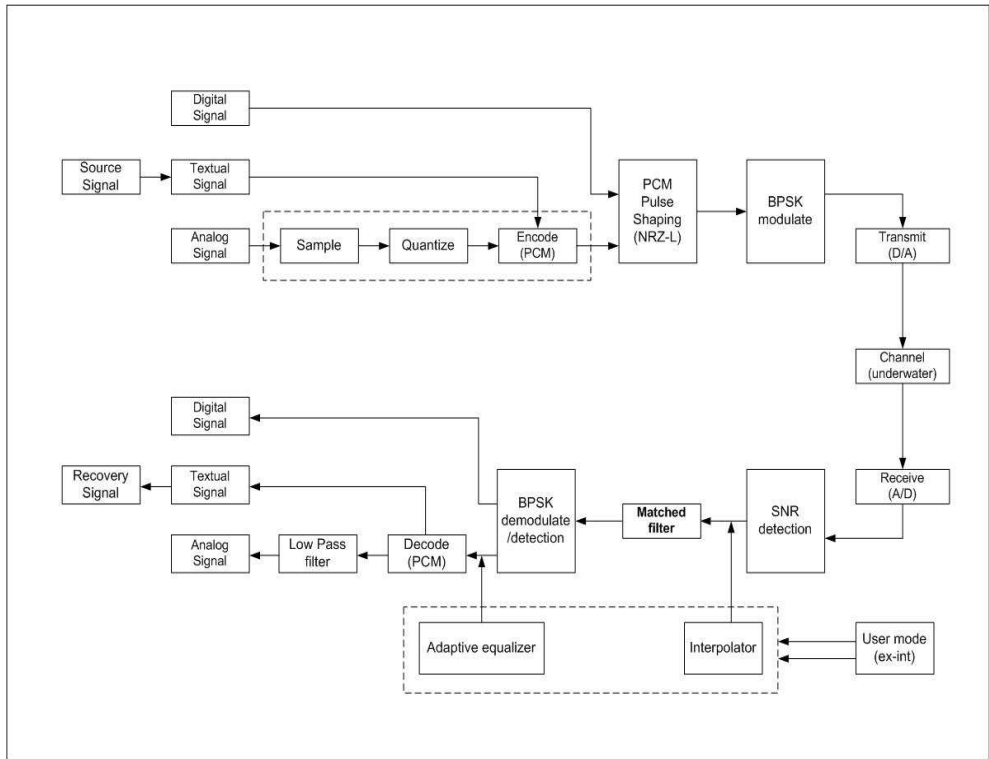


그림 3-1. 송·수신기 알고리즘 블록도

그림 3-1에서 알 수 있듯이, 송신기에서는 원본 신호들이 기저대역에서 PCM 방식에 의해 과형 변조되어 다시 대역통과 대역에서 BPSK 방식으로 변조된 후 D/A 변환을 통해 초음파 형태로 송신된다. 이렇게 변조된 신호들은 수신기에서 A/D 변환 과정을 거쳐 본 논문에서 구현하고자 하는 실시간 고속 데이터 처리설계의 핵심요소 중 하나인 SNR(Signal-to-Noise Ratio) detection block을 거쳐 적정 SNR을 판별한 후 BPSK 와 기저대역 복조 후 최종적으로 원본신호가 복원되게 된다.

여기서 구현된 시스템의 특징을 살펴보면, 먼저 송신기의 경우, 소스 신호에 해당하는 센서 측정값인 문자 정보는 기본적으로 16진수로 구성되어 있으며, 이를 BPSK변조를 하기 위하여, 프로그램적으로 16진수를 2

진수로 변환하는 과정을 거치게 된다. 이렇게 2진으로 구성된 신호는 NRZ-L방식으로 PCM Pulse Shaping 과정을 거친 후 아래 식(3-1)과 같이 BPSK 변조를 거쳐 송신신호를 생성하게 된다.

$$S_{PSK} = \begin{cases} S_1(t) = A \cos \omega_c t, & 0 \leq t \leq T_b \text{ (for binary 1)} \\ S_0(t) = -A \cos \omega_c t, & 0 \leq t \leq T_b \text{ (for binary 0)} \end{cases} \quad (3-1)$$

이때, 송신 전송 데이터 효율을 높이기 위해 신호열은 프레임 동기를 맞추기 위한 특별한 프리앰블을 가지지 않으며, 원본 신호 자체를 변조하는 방식인 D-BPSK 방식으로 구성되어 송신된다.

반면에, 수신기의 경우 SNR 검출기(SNR detection)를 거친 후 정합 필터(Matched filter)를 경유하여 BPSK 복조 후 다시 2진에서 16진 변환 과정을 거쳐 원본 신호를 복원하게 되는데, 이때 아래 그림 3-2에서 보이고 있는 수신기의 핵심 부분인 정합 필터 블록은 콘볼루션 적분의 이산형태와 같이 표현되며, 그 형태는 식(3-2)와 같이 정의 될 수 있다.

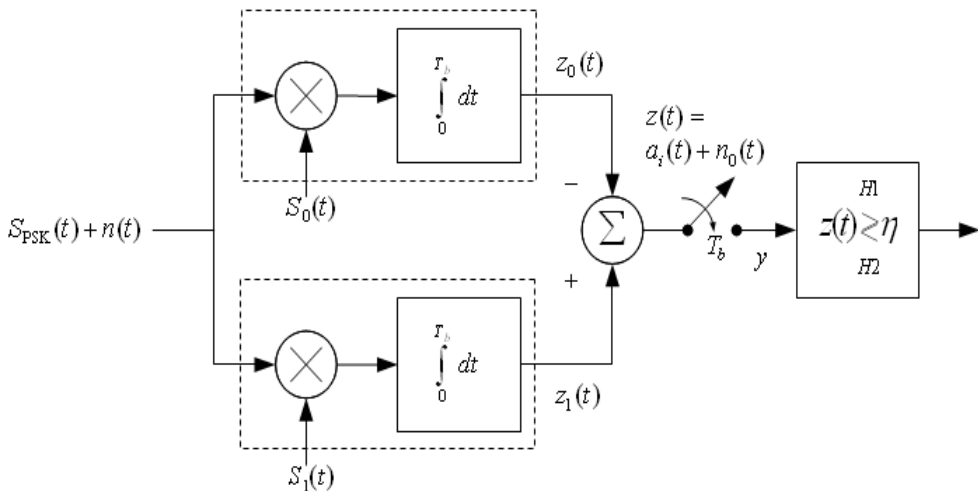


그림 3-2. 정합 필터 블록(Matched filter block/ correlator)

$$Z_i(t) = \sum_{n=0}^{N-1} a_i(k-t) + n_0(t) \quad (3-2)$$

여기서  $a_i(n)$ 은 반송파가 제거된 신호,  $n_0(n)$ 은 AWGN 신호이다

식(3-2)를 통해 알 수 있듯이, 정합 필터의 경우 기존의 일반적인 시스템에 비해 보다 연산량이 많아지지만, 복원력 측면에서는 훨씬 좋은 성능을 갖는다.

또한, 수신기에서는 부가적인 장치로 판별되는 SNR의 레벨에 따라 사용자 요청 방식(INTERRUPT)으로 보간기(Interpolator)와 등화기(Equalizer)가 가변적으로 동작하도록 구성된다.

아래 그림 3-3은 수신 시스템의 알고리즘 흐름도를 보여준다.



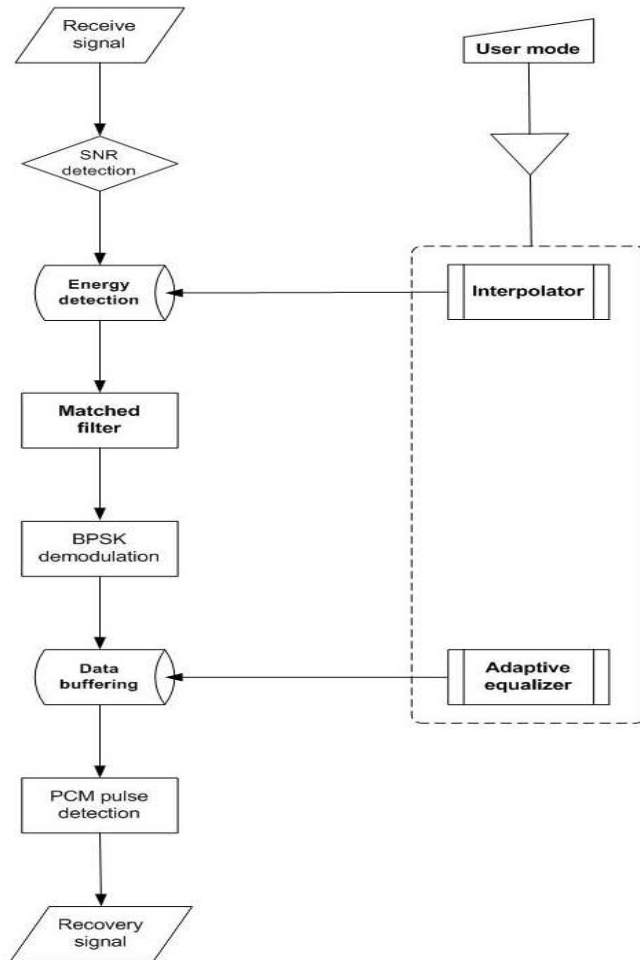


그림 3-3. 알고리즘 흐름도

위 그림 3-3의 알고리즘 흐름도상에 나타나있는 굵은 고딕체로 표기된 Energy detection block과 Data buffering block은 수식적으로 설계된 것이 아닌 하드웨어적으로 제어되는 부분이다. 특히 Energy detection block의 경우 EDMA(Enhanced Direct Memory Access)를 통해 대용량 메모리인 SDRAM을 사용하여, 입력된 신호 배열을 일괄적으로 저장 후 저장된 데이터 값을 순차적으로 불러들이면서 비교 연산 과정을 거치게

된다. 이렇게 검출된 값 중 최대값을 신호 배열의 초기 값으로 재배열 해주는 부분으로써, 간접적인 신호 동기화 효과를 얻을 수 있다. 특히 프레임 동기가 EDMA 컨트롤러 상에서 하드웨어적으로 맞춰지기 때문에 하드웨어적인 지연 값들도 보상할 수 있는 효과를 가진다. Data buffering 블록 역시 최대값을 산출해내는 과정을 제외하고 Energy detection block과 동일한 형태로 구성되어 있다.

### 제 3-2 절 시스템 구현 및 최적화

본 논문에서 구현하고자 하는 시스템의 전체적인 개요는 2장에서 소개를 하였다. 이번 절에서는 실제 시스템 구현에 사용된 하드웨어와 소프트웨어에 관하여 소개 할 것이다.

먼저, 아래 그림 3-4는 지역 센서 노드로 사용하기 위해 자체 제작된 보드로 주요 구성품으로 CPU는 ATmel사의 ATmega8535-16 pi(16MHz/16Mips)가 사용되었고, 해수 온도 측정용 센서로는 LM35DZ (0~100°)가 사용되었으며, 측정된 온도 데이터를 아날로그 변화하여, 송신하기 위해 Burr-Brown사의 DAC712 Digital-to-Analog converter를 사용하여 제작하였다. 또한 물속에서 실제 실험을 위해 실리콘으로 방수 처리를 하였다.

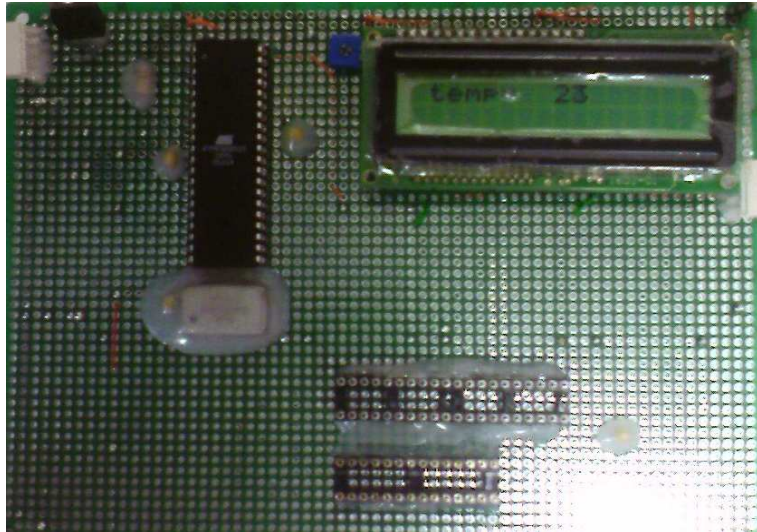
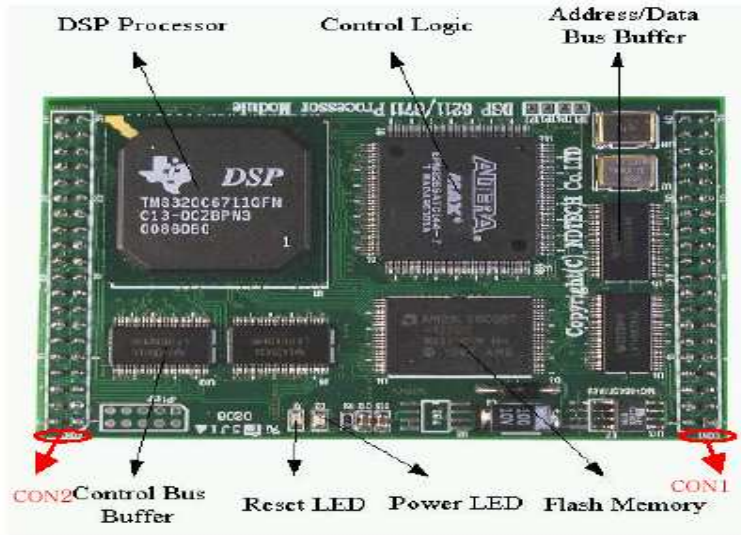


그림 3-4. 제작된 지역 센서 노드용 보드

지역 센서 노드는 단일의 광역 센서 영역 내부에서 해수온도를 100ms 간격으로 직접 측정하는 기능을 수행하며, 이렇게 채집된 온도 데이터를 1s간격으로 해당 지역 내의 광역 센서 노드로 전송하는 기능을 담당한다. 이에 따라 최대한 효율적 기능 수행을 위해, 실제 시스템에 적용될 때는 위 그림과는 달리 LCD부분을 제거하는 대신, 신호 전송을 위한 증폭단이 탑재 되게 된다.

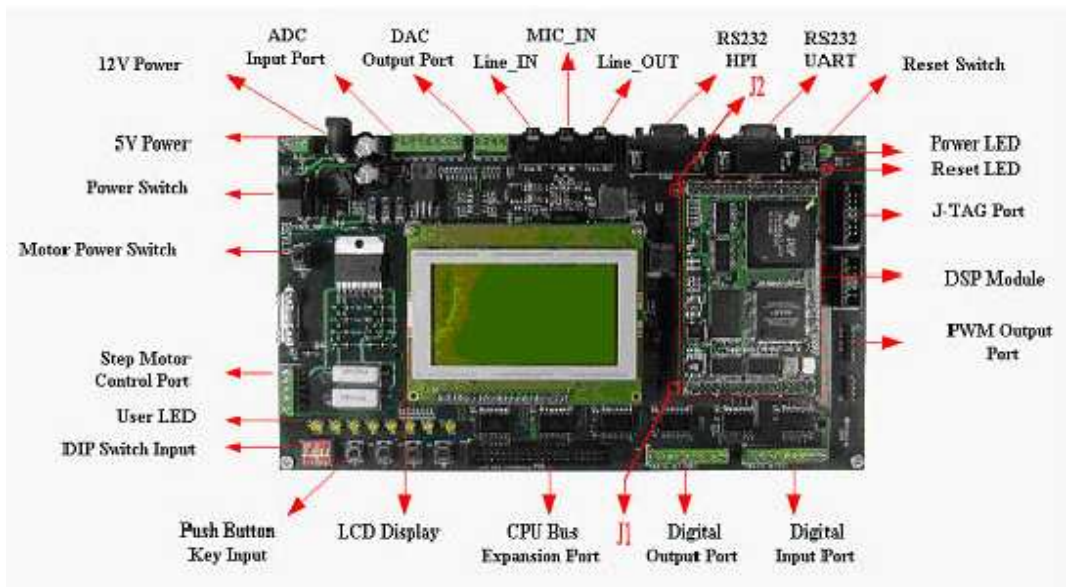
반면에 광역 센서 노드의 경우, 앞서 2장에서 소개한 수중 통신 모델의 송수신 시스템을 다 갖는 형태이며, 광역 센서 영역 내의 지역 센서 노드뿐만 아니라 이웃한 지역에 위치한 광역 센서 노드와의 통신을 위해 보다 고사양의 하드웨어와 좀 더 복잡한 알고리즘이 탑재된 소프트웨어가 사용된다. 먼저 광역 센서 노드를 구현하기 위해 사용된 하드웨어로는 TI사의 TMS320C6711B DSP 프로세서 모듈이 탑재된 nd-tech사의 DSP STAR 개발 보드가 사용 되었으며, GUI interface를 갖는 개발 툴

인 CodeBuilder를 사용하여, 본 논문의 성능 검증 및 시스템의 소프트웨어적인 부분을 구현하였다. 아래 그림 3-5, 3-6은 광역 센서 노드의 두 뇌부에 해당하는 DSP 프로세서 모듈과 DSP STAR 개발 보드이며, 아래 표 3-1은 이 보드의 주요 제원을 나타낸다.



DSP STAR Processor Module

그림 3-5. DSP 프로세서 모듈



DSP STAR Board

그림 3-6. DSP STAR 개발 보드

표 3-1. 광역 센서 보드 특징

구성요소	특징
Audio Codec	8K,16K Sample rate, 125Ksps, Linear PCM
AD Converter	4Channel, 12Bit, Serial Interface
DA Converter	120Ksps, 8Channel,12bit, Serial Interface
Step Motor	Step Motor Control Port
Graphic LCD	128*64
User LED	8개 User LED
Push Button Key	4 Push Button Key
Dip Switch	4 Dip Switch

<i>CPU Expansion Bus Port</i>	<i>16Bit Data/Adress,1Chip Select 1 Read/Wire, 1Output Enable</i>
Digital I/O	8 Bit Input/ Output
PWM Port	4 PWM Output Port
J-TAG	J-TAG Interface
Reset Switch	Push Button Reset Switch

성능 검증에 따른 제반 사항들을 살펴보면, 150MHz의 동작 속도를 갖는 DSP 프로세서와 최대 16KHz의 샘플링 주파수를 갖는 12bit Analog I/O 코덱, 프로그램 전용 1MByte 플래시 메모리와 다량의 데이터 저장용으로 32MByte용량을 갖는 SD RAM으로 구성되어 있다. 실제 성능 검증에 사용된 규격은 아래 표 3-2에 나타나 있다.

표 3-2. 시스템 제원

Sampling rate	8/16KHz
Qunatization level	12bit
Carrier frequency	2/4/8KHz
Data rate	1/2/4Kbps
Symbol rate	125/250/500sps
Symbol length	8bit
Source signal	ASCII code

본 논문에서 구현하고자 하는 시스템의 성능 검증에 필요한 특징들은 위의 표 3-2에 나타내었다. 이제부터 제안된 시스템의 성능을 표 3-2에서 서술한 것을 토대로 검증해 보도록 하겠다.

먼저, 일반적으로 이론적인 알고리즘을 토대로 시스템을 구현 시 하드웨어 사용 미숙으로 인해 간과하기 쉬운 부분 중 하나인 개발에 사용되는 하드웨어를 최적화하였다. 이런 최적화의 장점으로서는 입출력 신호의 병목 및 지연 현상으로 인한 미묘한 동기 차이를 맞추기 위해, 복잡한 연산 과정을 갖는 PLL등과 같은 동기화 알고리즘을 굳이 사용하지 않고도 동기를 간접적으로 맞출 수 있을 뿐만 아니라, Matlab과 같은 시뮬레이션 툴을 통해 개발된 알고리즘을 실제 하드웨어에 적용하였을 때 발생하는 중복 연산 및 데이터 영역의 비효율성등을 최소화하여, 이론적인 결과에 근접하는 결과를 산출 할 수 있다. 또한, 실시간 연산을 위해 DSP 프로세서 내부에 있는 외부 기기를 제어하는 고성능 컨트롤러를 DSP core와 병렬적으로 구동함으로써, 동일 시간내에 처리 속도 및 효율을 높일 수 있는 장점을 가진다. 일반적으로 알고리즘에 치중하여 구현하였을 경우와 최적화 과정을 통해 구현하였을 경우의 차이는 아래 그림 3-7, 3-8에서 확인해 볼 수 있다.

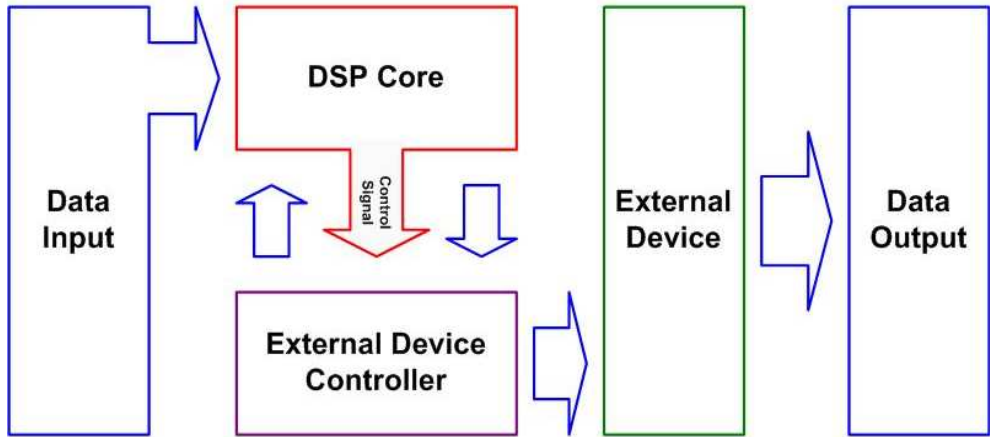


그림 3-7. 이론적인 알고리즘에 치중하여 구현한 경우

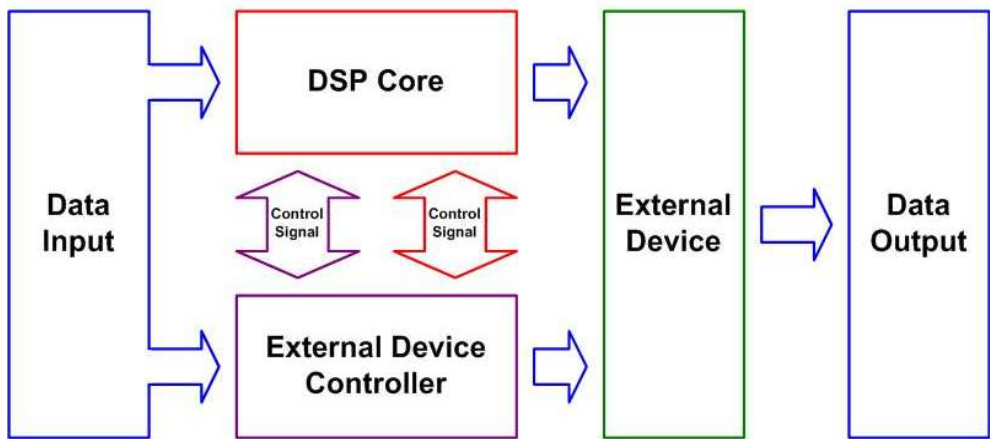


그림 3-8. 최적화 과정을 통하여 구현한 경우

이런 최적화 과정은 시스템을 실시간 구동하기 위해 매우 중요한 요소이며, 대부분 시뮬레이션을 통해 구현된 시스템들이 실시간 처리에 난항을 갖게 되는 요소가 바로 이 부분에 기인한다 해도 과언이 아니라 할 수 있다. 본 논문에서는 무엇보다 시스템의 실시간 처리에 초점을 맞추고 있어 이런 최적화 과정에 많은 노력을 기울였다. 아래 그림 3-9는 사용



된 DSP 프로세서의 내부 블록도를 나타낸다.

functional block and CPU (DSP core) diagram

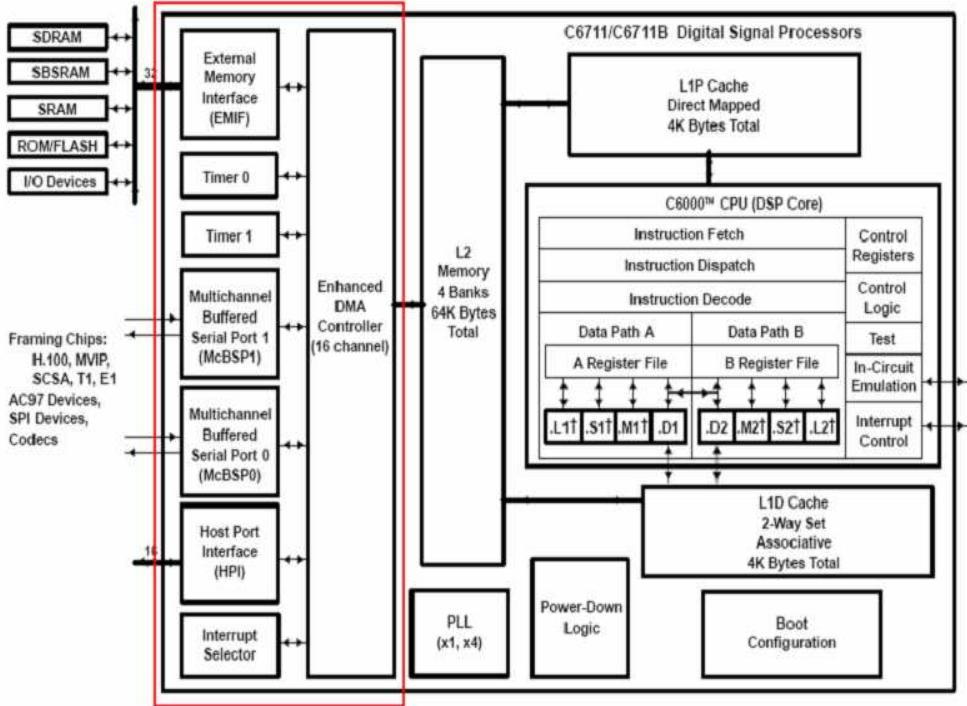


그림 3-9. DSP 프로세서 내부 블록도

최적화 과정의 첫 번째 단계로, 실제 신호의 입출력 효율을 높이기 위해 위 그림에서 붉은색 블록 내부에 있는 McBSP(Multi Channel Buffered Serial Port)를 데이터 입출력 통로로 사용하였다. 이것은 TI사의 DSP 프로세서만이 갖는 고유한 기능으로 일반적인 타 프로세서들이 범용 데이터 버스를 사용하는데 비해, 이 통로는 아날로그 신호 전용으로 Audio Codec과 AD/DA converter와 DSP core가 다른 신호의 간섭 없이 직접 연결되는 통로이다. 이것을 사용함으로써, 시스템에서 전송 신호를 송수신시 신호의 연산처리 과정까지의 처리 시간 및 효율을 높일

수 있었다. 아래 그림 3-10은 최적화 과정의 첫 단계를 블록 다이어그램으로 보여준 것이다.

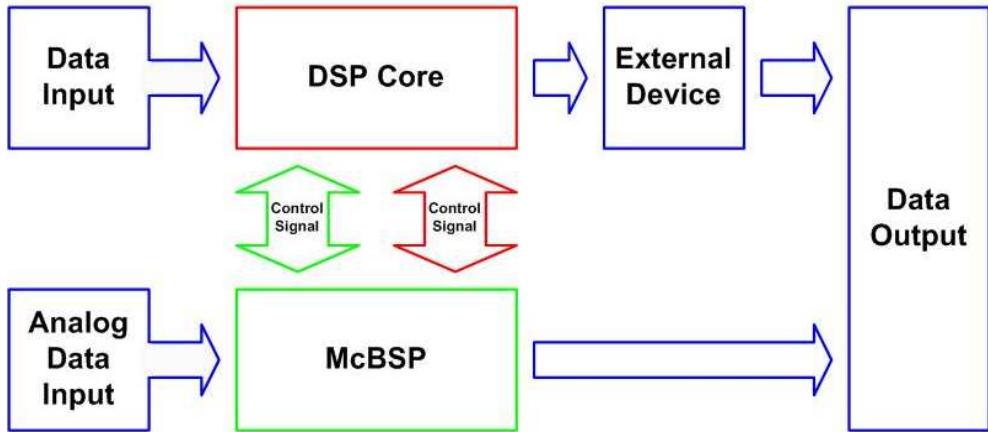


그림 3-10. McBSP와 DSP core간의 통신 블록도

두 번째 단계로, 시스템 동작 시 사용되는 대용량 데이터 처리 관리를 위해 EDMA(Enhanced Direct Memory Access)를 사용하였는데, 이는 DSP core가 연산과정을 수행 하는 동안 McBSP를 통해 외부 데이터가 입력되었을 시, 연산과정 기능을 떨어뜨리지 않고, 동시에 데이터를 저장, 처리하여 병렬적으로 2개 이상의 기능 처리가 가능하도록 할 수 있다. 특히 DSP 프로세서 외부에 확장되어 장착되어있는 32MByte 용량의 고용량 메모리를 이 컨트롤러가 직접 제어함으로써, 시스템의 성능을 최대화 할 수 있다. DSP core는 이 컨트롤러를 통해 처리된 데이터를 읽고/쓰는 연산만 수행할 수 있기 때문에, 보다 나은 성능을 발휘할 수 있다. 아래 그림 3-11은 EDMA를 이용한 최적화 블록 다이어그램을 보여준 것이다.

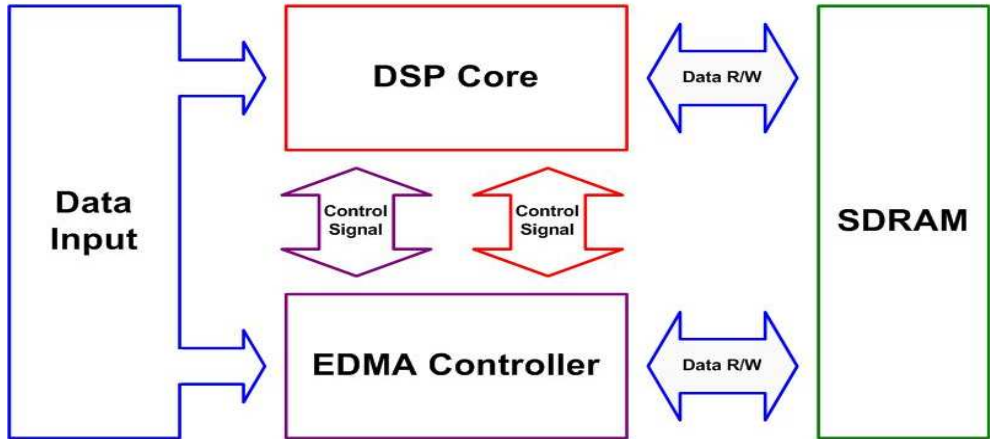


그림 3-11. EDMA를 이용한 최적화 과정 블록도

이 두 가지 컨트롤러 외에도 본 논문에서는 Interrupt 컨트롤러를 통해, 앞서 그림 3-3의 알고리즘 흐름도에서 보인 사용자 요청에 의한 보간기 및 등화기를 사용하게 된다. 이 컨트롤러는 기본 기능 수행 시, 사용자 요청(본 논문에서는 판정되는 SNR값)에 의해 필요한 순간에 발생하여 구동되었다가 다시 발생 바로 전 단계의 기본기능을 수행하도록 동작하기 때문에, 별다른 손실 없이 다시 기본 기능을 수행 할 수 있다.

## 제 4 장 시스템 성능 검증

본 논문에서 구현한 시스템은 Matlab등과 같은 simulation tool을 통해, 시뮬레이션적으로 설계된 것이 아닌, 직접적으로 개발 보드와 GUI Interface를 갖는 개발 툴을 통해 시스템의 성능을 검증하였다.

성능 검증은 크게 지상과 수중 두 가지로 진행되었는데, 먼저 지상의 경우 이상적인 시스템 동작 특성을 얻기 위해 DSP core 내부적으로 전송 신호 및 노이즈 신호 데이터를 생성하여, 송수신하는 형태로 수행하였으며, 이를 토대로 하여, 실제 아날로그 신호 입·출력을 개발 보드에 장착 되어 있는 오디오 코덱을 유선으로 연결하여, 신호 처리를 하는 형태로 수행하였다. 성능 검증의 마지막 단계로는 조그마한 수조에서 송수신부와 센서의 송·수신부를 이용하여 직선으로 10 cm정도 거리, 수심 20 cm, 폭 30 cm 를 두고 실시하였는데, 이는 다중경로에 의한 신호 손실을 방지 하고 직접파만 수신하기 위한 것으로, 매우 좁은 거리를 두고 실시하였다. 본 논문의 근본적인 목표인 수중환경에서 실험은 고가의 수중통신 장비를 갖추지 못하여, 그 부분에 대해서는 검증을 하지 못하였다. 또한 세 가지의 검증 단계에서 사용된 반송파는 2/4KHz를 사용하였으며, Sampling rate는 8/16KHz, Data rate는 125/250sps, 전송 Symbol 은 8bit 간격으로 초기 값으로 'Hello'를 전송하고 이후부터는 temp = '측정된 온도 값'을 사용하였다. 실험 시 측정된 온도 값은 25°이다. 또한 사용자 모드인 보간기와 등화기는 본 실험에서는 사용하지 않았다. 이는 시스템의 기본적인 통신 성능을 검증하는 차원에서 행한 실험이며, 실시간 처리 여부를 우선적으로 가늠해보고자 하는 목적 하에 수행된 실험이기 때문에, 보다 복잡한 연산과정을 갖는 부분은 제외되었다. 아래 표

4-1은 실제 실험에 적용된 제원이다.

표 4-1. 성능 실험 제원

Sampling rate	8/16KHz
Qunatization level	data :12bit, gain : 4bit
Carrier frequency	2/4KHz
Data rate	1/2Kbps
Symbol rate	125/250sps
Symbol length	8bit
Source signal	ASCII code
Development board	DSP STAR
Development tool	CodeBuilder
Environment	Width : 30cm, Height : 20cm, Range : 10cm

표 4-1에서 Source signal란에 명기 되어있는 ASCII는 실제로 전송에 사용된 신호 배열이 수치 형태의 정보지만 CPU에서 읽고 쓰는 형태가 문자 형태이므로 그에 대응되는 ASCII 값을 사용하기 때문이다.아래 그림 4-1은 실제 실험에 사용된 수조의 규격이다.

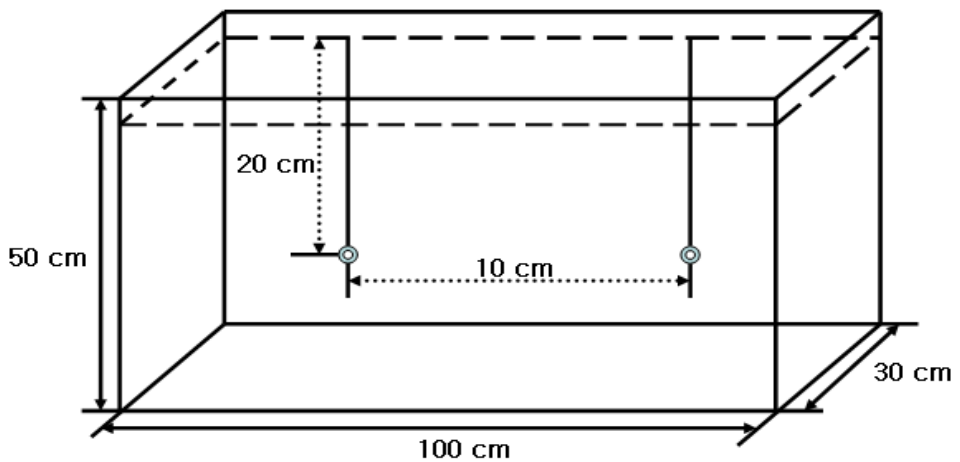


그림 4-1. 실험에 사용된 수조의 규격도

아래 그림 4-2 ~ 16은 실제 실험을 통해 검증된 결과를 개발 툴의 GUI를 통해 확인된 결과를 나타낸 것이며, 이 GUI는 실제 DSP 프로세서를 통해 연산된 결과를 산출하여 그림으로 표시한 것으로써, Digital Real-Time Oscilloscope로 측정된 것과 동일한 기능을 수행한다. 또한 두 종류의 실험을 통해 수집된 데이터는 보다 정확한 결과를 확인하기 위해 프로그래밍 상에서 저차원 파일 입출력을 통해 'Text' 형식으로 데이터 파일을 생성 후 Excel과 Matlab을 통해 개발 툴과 비교 검증하였다.

지상 실험의 경우는 보다 정확한 검증을 위해 신호 열 중 100개의 샘플들을 뽑아 비교하였고, 수조 실험의 경우는 산출된 결과들 중 320개의 샘플 값들을 뽑아 검증하였다. 이 두 실험에서 사용된 샘플은 총 7680개를 사용 하였으며, 이는 총 길이가 96 bit인 'Hello temp=XX'라는 문자열을 8bit 간격으로 파형 변조 하여, 한번에 10번 씩 반복하는 형태로 사용된 총 샘플 값이다.

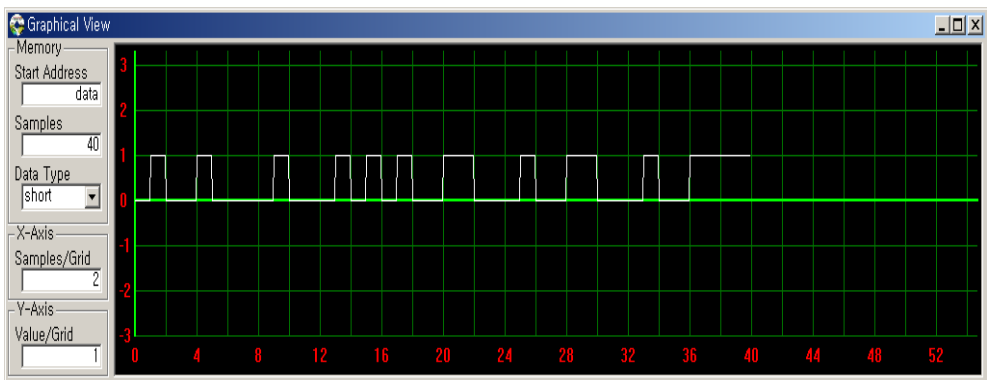


그림 4-2. 원본 데이터 신호

그림 4-2는 전송 신호의 원본 데이터 열로써, temp란 문자열과 측정된 온도 값인 25의 ASCII 값인 16진 코드열을 2진 코드열로 변환 후 PCM pulse로 나타낸 형태이다.

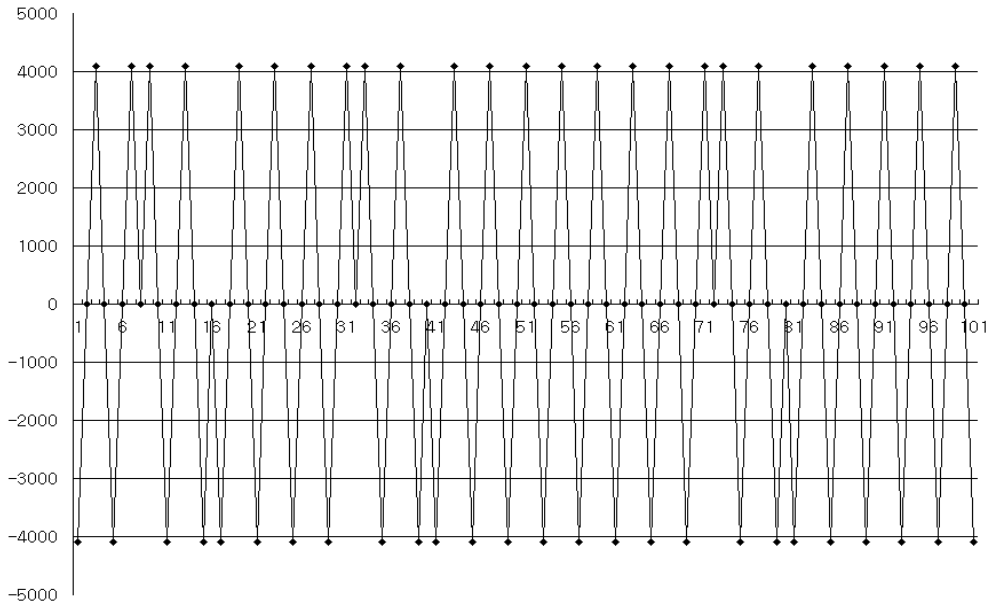


그림 4-3. BPSK 변조된 신호

그림 4-3은 기저대역에서 PCM pulse shaping 후 BPSK 변조된 신호열을 나타낸다.

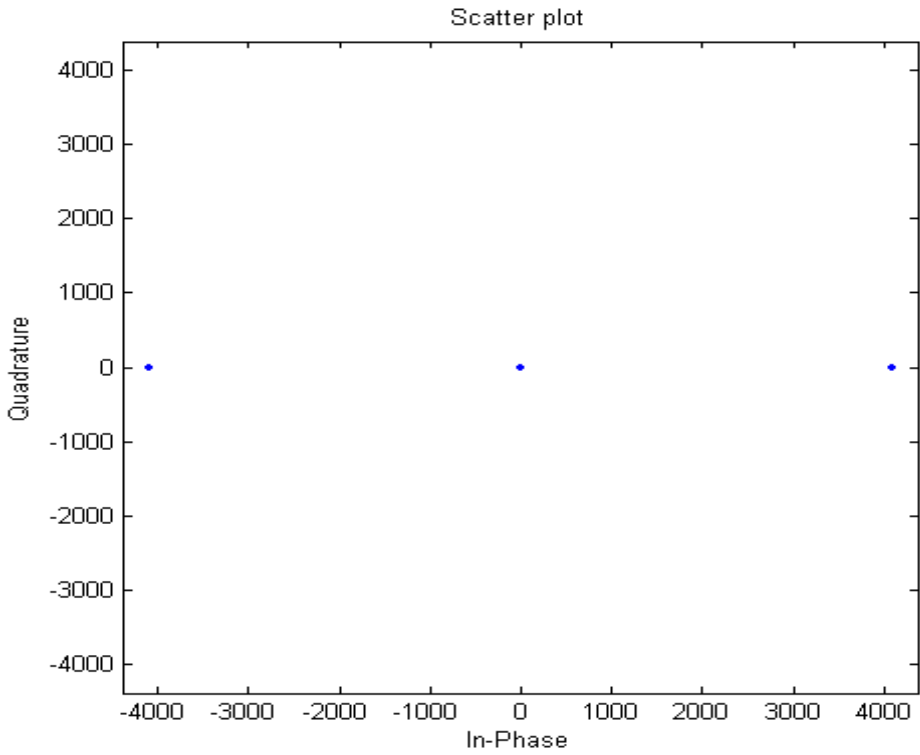


그림 4-4. 이상적 환경에서 BPSK 신호 성상도

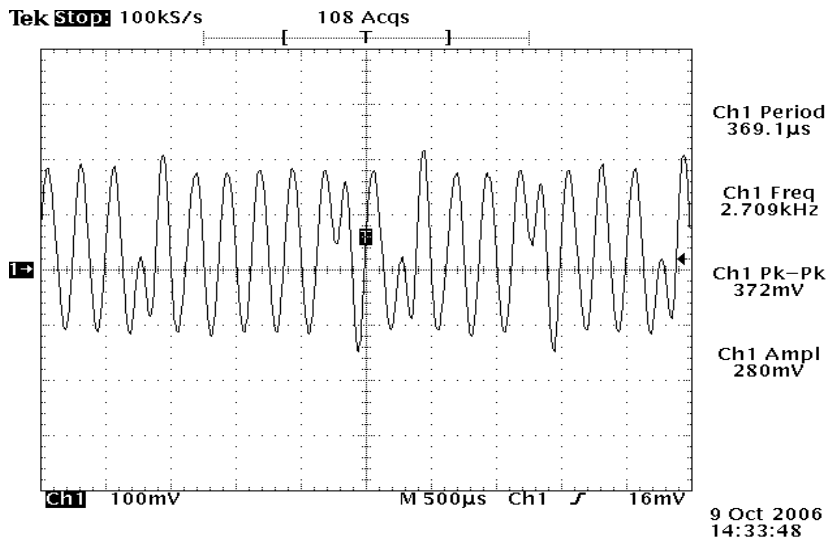


그림 4-5. 이상적 환경에서 BPSK 신호 실측 파형.



그림 4-4는 BPSK 변조 신호의 정상도를 나타내며, 그림 4-5는 실제 Digital Real-Time Oscilloscope로 측정된 파형을 도시한 것이다.

아래 그림 4-6은 지상 실험의 첫 단계인 DSP core 내부연산을 통해 얻은 이상적인 환경에서 수신된 후 최종적으로 복원된 신호 배열을 나타낸다.

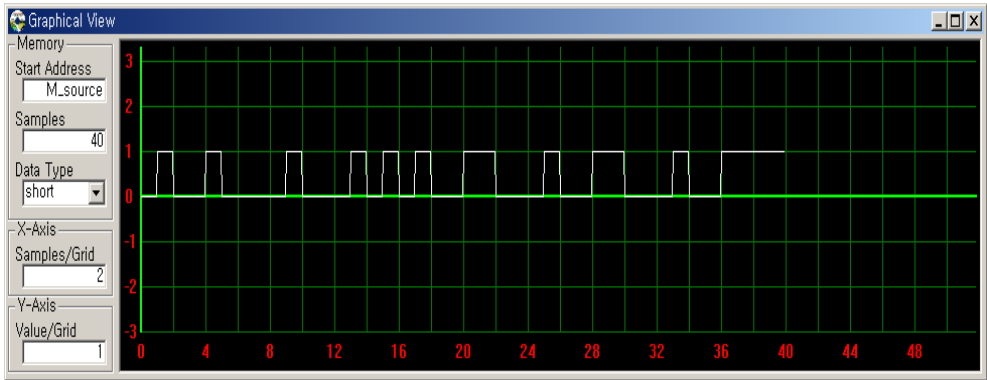


그림 4-6. 이상적 환경에서 복원 신호

아래 그림 4-7, 4-8은 지상 실험의 두 번째 검증 단계로 RCA cable을 이용하여, 유선으로 실제 외부 입출력 장치인 오디오 코덱을 통해 전송 신호가 입력된 결과이다. 아래 그림 4-7에서 살펴보면, 초기 값이 3 샘플 지연이 발생한 것을 확인 할 수 있는데, 이는 오디오 코덱에서 신호 응답 속도 차에 의한 지연현상으로 하드웨어적인 지연 값에 해당한다. 이렇게 지연된 신호는 그림 3-3에서 소개한 바와 같이 Energy detection block을 거쳐 지연 값이 조정된 후 그림 4-8과 같이 보정된다.

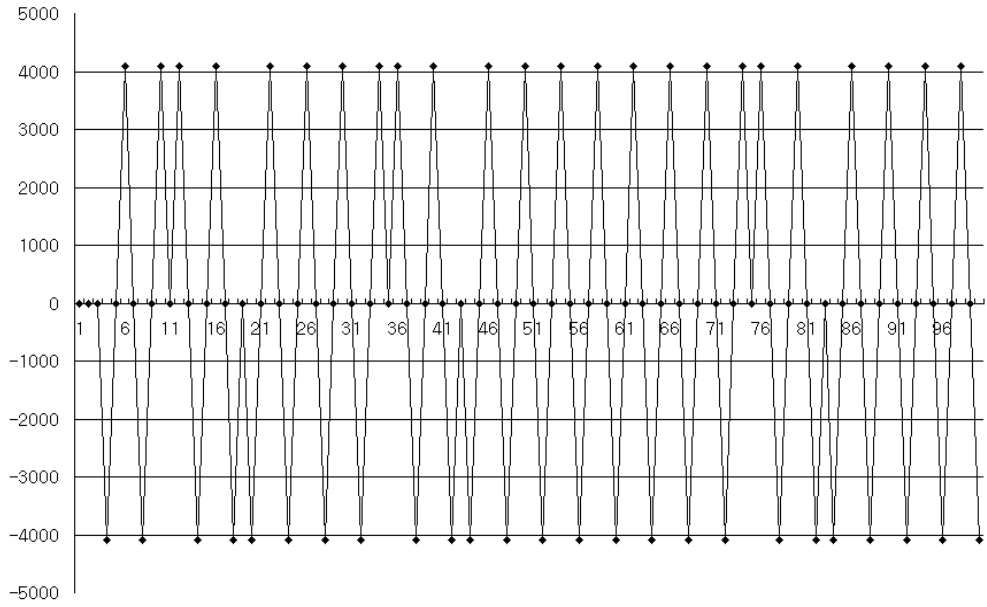


그림 4-7. 유선환경에서 입력된 전송 신호(3 sample delay)

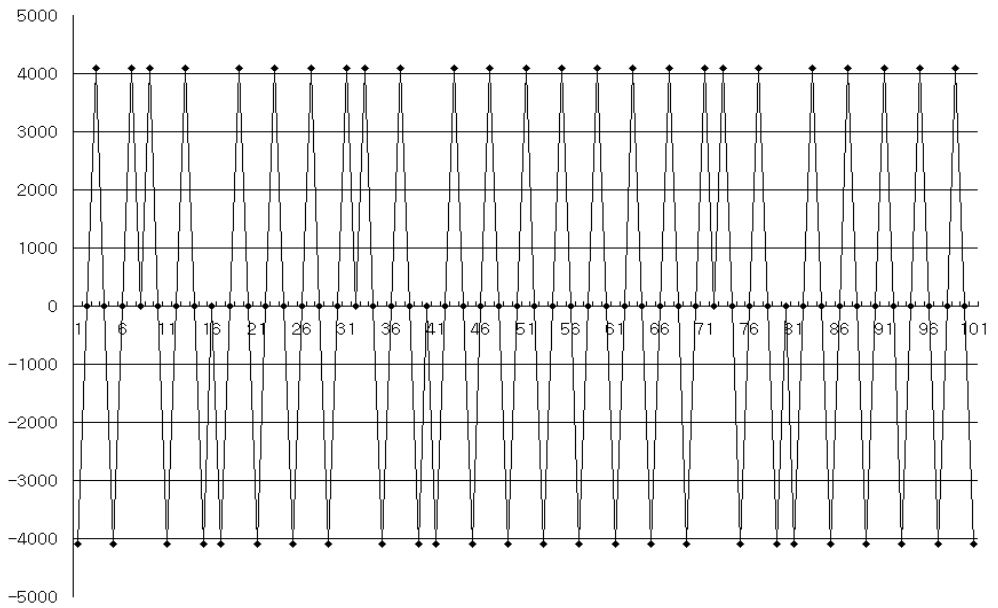


그림 4-8. Energy detection block을 통해 보정된 신호

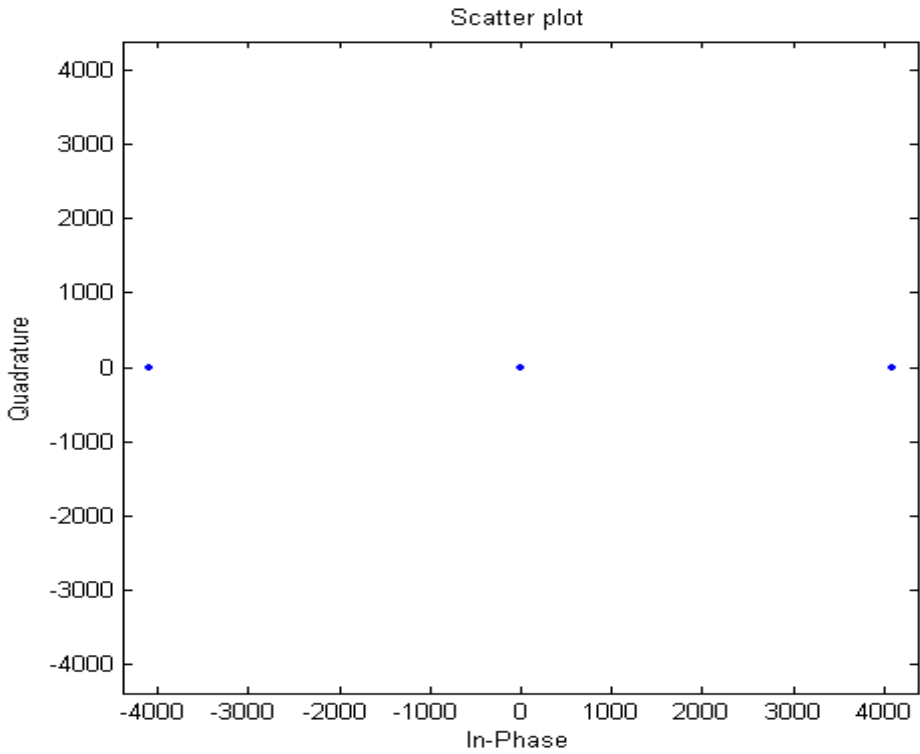


그림 4-9. 유선 환경에서 BPSK 신호 성상도

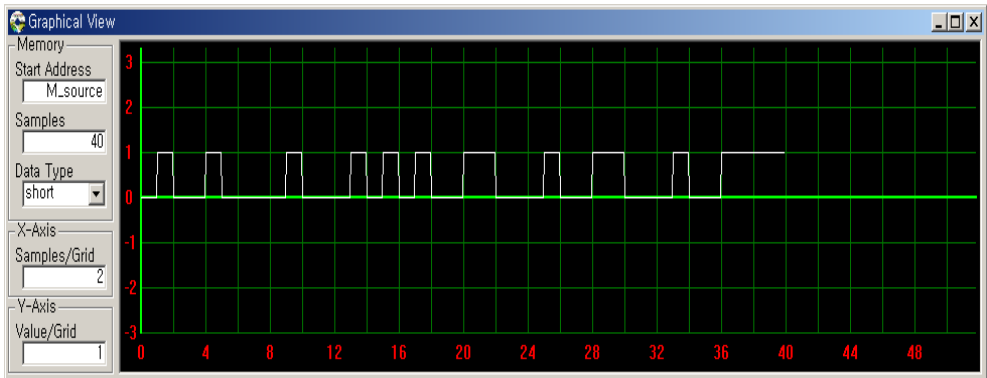


그림 4-10. 유선환경에서 복원 신호

그림 4-9, 4-10은 지상 실험의 두 번째 단계인 유선을 이용한 통신 실험의 BPSK 신호 성상도와 복원된 신호 배열을 나타낸다. 이 결과들은 이

상적 환경 하에서 실험한 것과 동일한 결과를 보인다.

아래 그림 4-11 ~ 4-17은 수조에서 실험을 수행한 후 나타난 결과로서, 지상에서 실험한 값에 비해 신호 왜곡과 찌그림짐이 두드러지게 나타남을 확인할 수 있다. 이는 실험에 사용된 장비의 불안정성으로 인한 잡음과 수중 환경에 의한 영향 등 수조 실험 시 지상에 비해 여러 잡음원이 산재해 있다는데 그 원인을 두고 생각 해 볼 수 있다. 특히 실제 실험에 사용된 수신 보드에서, 외부 수신 센서와 연결을 하였을 시 DC bias 현상과 가우시안 백색잡음 성분이 발견되었는데, 이러한 장비의 불안정성이 여기에 대한 큰 원인중 하나라 할 수 있다.

수조 실험은 데이터 전송률과 반송파를 각각 125/ 250sps[1/2kbps], 2/4KHz로 변화 시켜가며, 실험을 수행하였다.

data rate를 125sps로 고정하고, 반송파만 2/4KHz로 가변 하였을 경우의 수신 신호와 복원 데이터는 그림 4-11에서 확인 할 수 있으며, 지상 신호에 비해 신호 상태가 불량하지만 신호 포락선의 전반적으로 변조 신호 형태를 유지하고 있음을 확인할 수 있다.

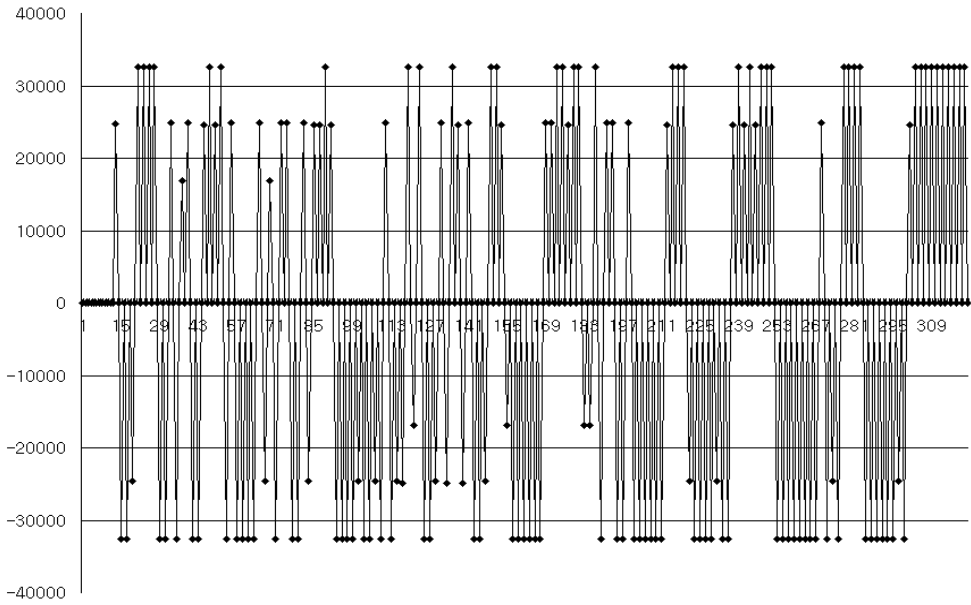


그림 4-11. 수조 환경에서 입력된 전송신호(data rate 125sps, carrier 2/4KHz)

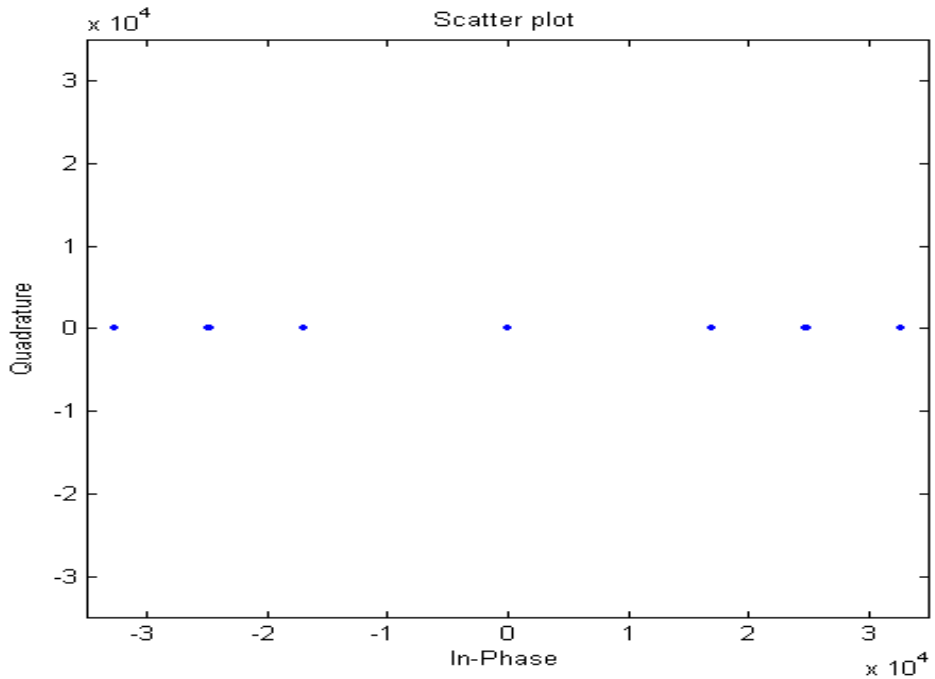


그림 4-12. 수조 환경에서 BPSK 신호 정상도(data rate 125sps, carrier 2/4KHz)

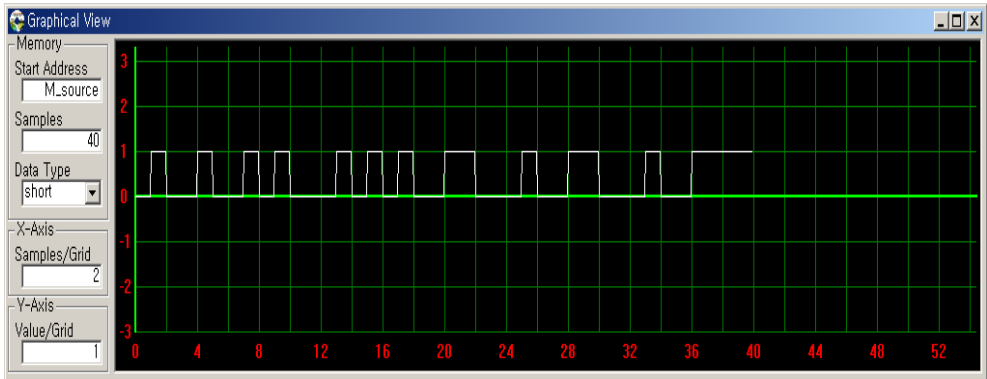


그림 4-13. 수조환경에서 복원 신호(data rate 125sps, carrier 2/4KHz)

그림을 보면, 7번째 샘플 값에서만 복원 오류가 발생하였고, 나머지는 정상적으로 복원되었다. 그림 4-14는 data rate를 250sps로 고정하고, 반송파만 2/4KHz로 가변 하였을 경우의 수신신호와 복원 신호 배열을 나타낸 것이다. data rate가 125sps였을 때와는 달리 신호의 대부분이 감쇄되어졌음을 확인 할 수 있다. 복원 신호 배열 역시 원본 신호 배열과는 전혀 다른 값이 산출되었음을 보인다.

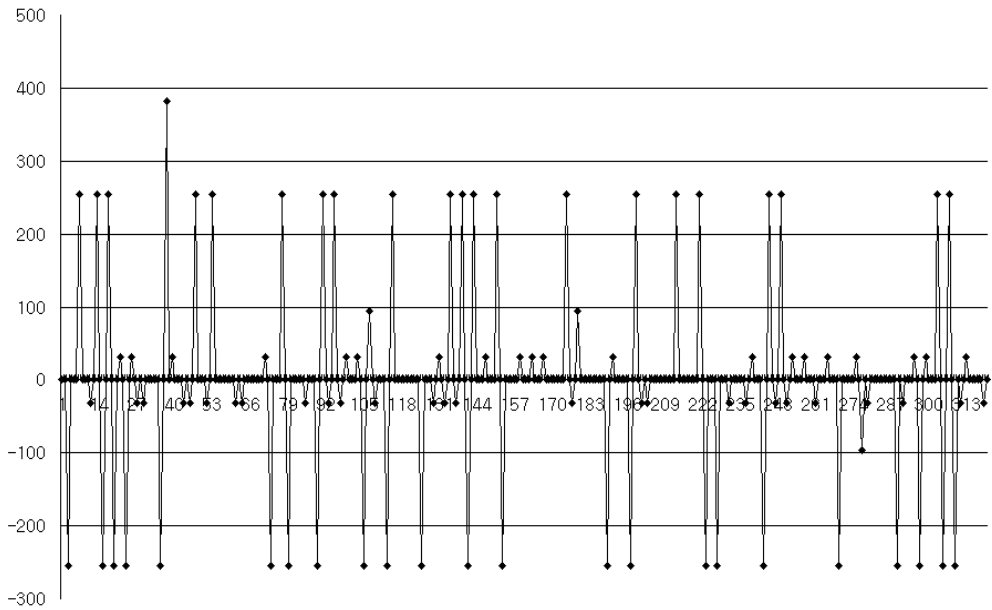


그림 4-14. 수조 환경에서 입력된 전송 신호(data rate 250sps, carrier 2/4KHz)

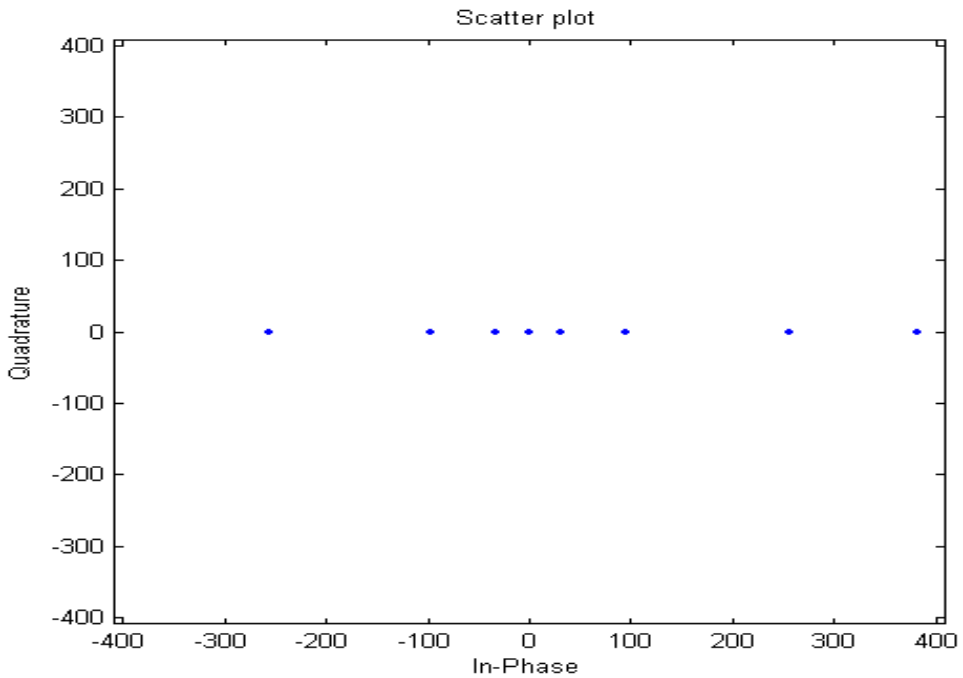


그림 4-15. 수조 환경에서 BPSK 신호 정상도(data rate 250sps, carrier 2/4KHz)

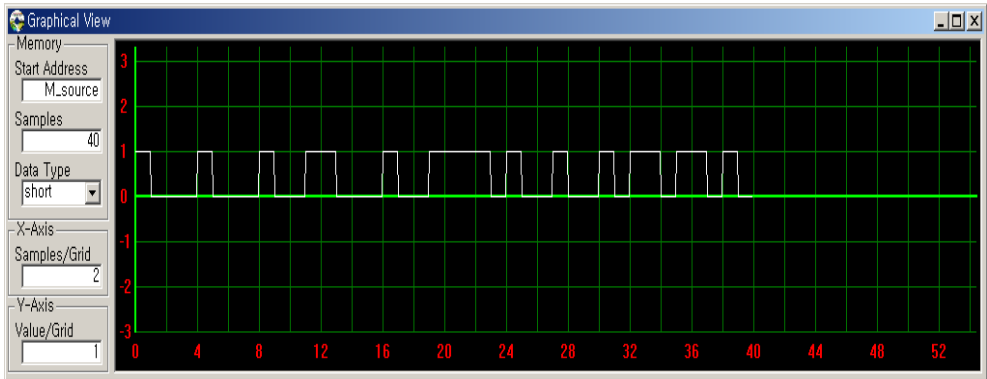


그림 4-16. 수조환경에서 복원 신호(data rate 250sps, carrier 2/4KHz)

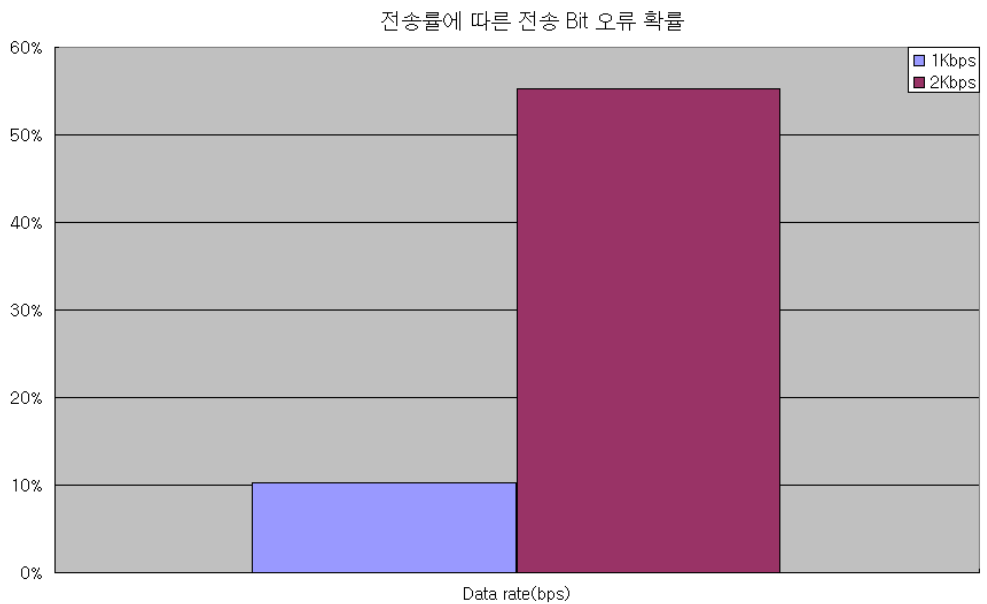


그림 4-17. 전송률에 따른 전송 비트 오류 확률

위 그림 4-2~17은 본 논문에서 제안하고 있는 시스템의 성능을 두 단계로 나눠 검증해 본 결과 그림이었다 여기서, 지상 실험의 두 번째 단계에서 초기 값이 3 샘플 지연 값을 갖게 되는 현상이 발생하였는데, 이는 오디오 코덱의 물리적인 성능에 의한 영향으로 인해 데이터 값이 오



류가 나는 현상으로, Energy detection block을 구성하여 EDMA 컨트롤러를 통해 메모리에 임시로 저장 후 다시 불러들인 다음 신호 배열을 재배열 하는 과정을 통해 처리함으로써, 별다른 문제없이 복원됨을 확인하였다.

마지막 단계인 수조실험에서 데이터 전송률과 반송파를 다소 높여 실제 초음파 센서를 통해 입출력 실험을 처리한 결과를 그림 4-17을 통해 살펴보면, 전송률이 1kbps일 때 오류 확률이 10%에 불과 하였지만, 2kbps로 전송률을 두 배 증가 시켰을 때 오류 확률이 55%로 증가하면서, 원본신호와 다소 동떨어진 형태를 보였다. 이는 전송률이 높아짐에 따라 잡음이 증가되는 이유도 있지만, 실제 실험에 사용된 초음파 센서가 정밀성이 떨어지는 가변저항에 의해 반송파를 바꾸는 형태라는 것과 수신 보드의 Audio Codec에서 발생하는 DC bias 현상 등이 전송 속도와 반송파가 빨라짐에 따라 크게 작용하여 신호를 제대로 판독하지 못하게 하는 원인으로 작용한 것으로 생각할 수 있다. 그러나 신호 복원측면에서는 처음 설계한 바와 마찬가지로 기본적으로 1kbps [125sps] 이하의, data rate를 갖는 수중 통신 시스템에서는 실시간으로 원본 신호와 거의 동일하게 복원할 수 있음을 확인하였다.

## 제 5 장 결 론

본 논문에서 구현한 시스템은 수중 센서 네트워크 시스템의 기본 단위인 광역 센서 노드 지역에서 단일 광역 센서 노드와 지역 센서 노드 간의 1:1 통신을 수조 실험을 통해 검증한 것으로 시스템 구현의 초기 목적인 실시간 데이터 처리 측면에서는 좋은 결과를 보였다. 그러나 성능 검증 시 다중 경로를 통해 들어오는 신호 성분은 무시하고 직접파만 있다는 전제하에 수행하여 위상 동기를 맞춰 주는 처리 단을 부가적으로 구성하지 않고 수신된 데이터를 하드웨어 최적화 기법인 에너지 검출기를 통해 수신 신호를 재배열함으로써, 신호 및 프레임 동기를 간접적으로 맞춰 준 것이다. 따라서 향후 전반적인 수중 센서 네트워크 시스템을 구성 시 이러한 전제 조건들로 인해 다중 경로 성분, 도플러 천이 등에 의해 발생 할 문제들에 관해서는 다시 고려하여야 한다. 그러나 본 논문에서는 이러한 문제들을 고려하여, 그림 3-1, 3-2를 통해 확인 해 볼 수 있듯이 시스템 컨트롤에 있어, 사용자 외부 인터페이스 상에서 보간기와 적응형 등화기를 기본 기능 수행단과 상호 스위칭 방식으로 작동하도록 제어 블록을 구성하여 향후 사용하고자 하는 목적에 맞춰서 전체 시스템 수정 없이 그 부분만을 소프트웨어적으로 추가 할 수 있도록 구성하였다. 따라서 이후 다양한 목적에 맞춰 계속되는 연구를 통해 검증해 나가야 할 것이다. 끝으로 수조실험에서 데이터 전송률과 반송파를 다소 높여 실제 초음파 센서를 통해 입출력 실험을 처리한 결과 전송률이 1kbps에서 2kbps로 증가함에 따라 오류 확률 또한 10%에서 55%로 증가되었음을 알 수 있었다. 이는 전송률이 높아짐에 따라 잡음이 증가되는 이유도 있지만, 초음파 센서의 정밀성 문제와 수신보드의 Audio

Codec에서 발생하는 DC bias 현상, 센서와 수신보드 사이의 부정합 등과 같이 실제 실험에 사용된 하드웨어의 문제점들이 크게 작용하여 신호를 제대로 판독하지 못하게 하는 원인이 된 것으로 생각할 수 있다. 따라서 향후 보다 정확한 연구를 위해서는 적절한 하드웨어의 선택 역시 중요한 요소라고 생각된다.

## 참고문헌

- [1] Ian F. Akyildiz, Tommaso Melodia “Underwater acoustic sensor networks: research challenges” Ad Hoc Networks vol 3 (2005) pp 257-279
- [2] UnderWater Sensor Networks at BWN Laboratory, Georgia Institute of Technology, Available from <http://www.ece.gatech.edu/research/labs/bwn/UWASN/>.
- [3] AUV Laboratory at MIT Sea Grant, Available from <http://auvlab.mit.edu/>.
- [4] The Delay Tolerant Networking Research Group, Available from <http://www.dtnrg.org>.
- [5] M. Abolhasan, T. Wysocki, E. Dutkiewicz, A review of routing protocols for mobile ad hoc networks, Ad Hoc Networks 2 (1) (2004) 1 - .22.
- [6] O.B. Akan, I.F. Akyildiz, Event-to-sink reliable transport in wireless sensor networks, IEEE/ACM Transactions on Networking, in press.
- [7] K. Akkaya, M. Younis, A survey on routing protocols for wireless sensor networks, Ad Hoc Networks 3 (3) (2005) 325 - .349, in this issue.
- [8] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, Wireless sensor networks: A survey, Computer Networks 38 (4) (2002) 393 - .422.

- [9] C. Baru, R. Moore, A. Rajasekar, M. Wan, The SDSC storage resource broker, in: Proceedings of the 1998 Conference of the Centre for Advanced Studies on Collaborative Research, 1998
- [10] P. Bose, P. Morin, I. Stojmenovic, J. Urrutia, Routing with guaranteed delivery in ad hoc wireless networks, *ACM Wireless Networks* 7 (6) (2001) 609 - .616.
- [11] L. Brekhovskikh, Y. Lysanov, *Fundamentals of Oceans Acoustics*, Springer, New York, 2001.
- [12] J. Catipovic, Performance limitations in underwater acoustic telemetry, *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 15 (3)(1990) 205 - .216.
- [13] D. Kilfoyle and A. Baggeroer, "The state of the art in underwater acoustic telemetry," *IEEE J. Oceanic Eng.*, 25, pp 4-27,Jan. 2000
- [14] M.Stojanovic,J,Catipovic,andJ.Proakis "Phase-coherent digital communications for under water acousticchannels," *IEEE J.Oceanic Eng.*,19,100-111,Jan.1994.
- [15] 손근영, 노용주, 윤종락, "수중 데이터 통신 시스템 개발 - 변조방식의 성능 비교," 한국음향학회 학술발표회논문집 19권 2(s)호, 281-284, 2000.
- [16] 이외형, 김기만, "BPSK 변조를 이용한 수중 음향 통신의 실험적 고찰," 한국음향학회지, vol.22, no.5, pp.418-424, July.2003.
- [17] Daniel B. Kilfoyle and Arthur B. Baggeroer, "The state of art in underwater acoustic telemetry," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol.25,

no.1, pp.4-27, Jan. 2000.

- [18] A. Zielinski, Young H. Yoon, and Lixue Wu, "Performance analysis of digital acoustic communication in a shallow water channel," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol.20, no.4, pp.293-299, Oct. 1995.
- [19] M. Stojanovic, J.A. Catipovic, and J.G. Proakis, "Phase-coherent digital communications for underwater acoustic channels," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol.19, pp.100-111, 1994.
- [20] M. Stojanovic, "Recent advances in high-speed underwater acoustic communication," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol.21, pp. 125-136, 1996.
- [21] S.M. Dunn, J.J. Davies and S.A. Pointer, "A real-time high data rate acoustic communications receiver demonstration system," *IEEE Conf. Oceanic Eng*, Providence, Sept. 2000.