

# DSP 기반 초소형 수중 음향통신 모듈

이 동 수\*, 이 상 민\*, 박 성 준°

## DSP-Based Micro-Modem for Underwater Acoustic Communications

Dongsoo Lee\*, Sangmin Lee\*, Sung-Joon Park°

### 요 약

최근 들어 연근해와 내수면에서 수중 자원의 효과적 개발과 보존을 위해 다양한 수중 응용 시스템 발굴 및 활용의 필요성이 증대되고 있다. 이에 본 논문에서는 근거리 수중 이동통신 시스템, 수중 센서네트워크 시스템 등의 핵심 기술 중의 하나인 초소형 수중 음향통신 모듈의 디지털 모듈을 연구한다. 고속 연산처리가 가능한 디지털 신호처리 프로세서를 탑재한 수중 모듈의 디지털 모듈을 설계하고 제작하며, 개발된 하드웨어에 프레임 형성 기능과 채널부호 알고리즘들을 구현하고 실험함으로써 회로의 기능과 성능을 검증한다. 실험 결과에 따르면, 개발된 DSP 기반 디지털 모듈에서 전송속도 1 kbps의 길쌈부호 처리를 위해 필요로 하는 연산량이 DSP의 가용 연산 능력의 1% 이내에 불과하므로 개발된 하드웨어 플랫폼에 다양한 고효율 기저대역 알고리즘을 탑재함으로써 수중 모듈의 성능 개선을 모색할 수 있다.

**Key Words** : Underwater Communication; Acoustic Modem; Micro Modem; Digital Signal Processor

### ABSTRACT

Recently, the need for various underwater application systems targeting efficient resource exploration and aquatic ecosystem monitoring is rapidly increasing in littoral sea and inland waters. In this paper, we focus on the research and development of digital module of acoustic micro modem which can be used for underwater mobile communication systems and underwater sensor network systems. Specifically, a digital module of acoustic modem embedding digital signal processor is designed and implemented. On top of the developed hardware platform, physical layer frame generation and recovery and channel coding algorithms are mounted and tested in a water tank and a pond to verify its functionality and performance. According to experimental results, less than 1 percent of total computational power is consumed in the processing of frame control and convolutional code with the data rate of 1 kbps. Thus, the performance of micro modem could be improved by loading efficient baseband algorithms into the processor while maintaining the implemented hardware.

\* 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부) 재원의 한국연구재단 기초연구사업(2011-0013928)과 2013학년도 강릉원주대학교 교수연구년연구 지원에 의하여 수행되었음.

• First Author : 강릉원주대학교 전자공학과, [highwindl@hanmail.net](mailto:highwindl@hanmail.net), 정회원

° Corresponding Author : 강릉원주대학교 전자공학과, [psj@ieec.org](mailto:psj@ieec.org), 종신회원

\* 강릉원주대학교 전자공학과, [sangmin@gwnu.ac.kr](mailto:sangmin@gwnu.ac.kr), 종신회원

논문번호 : KICS2013-12-537, Received December 13, 2013; Reviewed January 20, 2014; Accepted February 20, 2014

## I. 서 론

지상의 식량, 에너지 자원이 점차 고갈되어 부족해질 것이 예상됨에 따라 내수면 및 연근해 양식, 해양 자원 발굴 및 채집의 중요성이 증대되고 있다. 또한, 급속히 진전되고 있는 지구온난화의 영향으로 수온 상승, 어족 자원 변화 등 연근해의 수중 환경이 급변하고 있으며 이러한 환경 변화를 적시에 추적하기 위해 주기적이고 지속적인 모니터링의 필요성이 대두되고 있다.

수중 음향통신 기술은 향후 다방면의 임무 수행을 위해 구축될 수중 응용 시스템의 핵심 기술 중 하나이다. 지난 수십 년간 연구 개발된 수중 음향통신 모델들은 해양 자원 개발, 해양 탐사, 군사적 이용 등의 장거리 일대일 통신을 목적으로 하는 고출력 모델이었으나, 최근 들어 수중 무선센서네트워크 시스템을 활용한 수질 및 수중 생태 모니터링, 소형 수중 로봇 시스템 등 다양한 응용 분야가 파생됨에 따라 소형 근거리 수중 통신 모델에 대한 연구가 증대되고 있다<sup>[1-3]</sup>.

미국 WHOI 연구소에서 개발한 마이크로 모델은 TMS320C5416 디지털신호처리기 (digital signal processor, DSP)를 탑재한 폭 114 mm, 길이 44 mm의 디지털 메인 보드를 기반으로 하고 있으며, 맞춤형 아날로그 모듈 및 트랜스듀서를 적층 및 장착함으로써 80~5400 bps의 전송속도와 50~100 W의 소비전력을 갖는 수중 모델로 구현된다<sup>[4]</sup>. 영국 Tritech에서 개발된 마이크로 모델은 트랜스듀서를 포함하여 직경이 50 mm, 높이가 76 mm에 불과한 초소형 크기와 7.92 W의 낮은 소비전력 특성을 지니지만 통신거리와 전송속도는 각각 500 m와 40 bps로 한정된다<sup>[5]</sup>. 또한, 미국 코네티컷 대학의 연구팀에서는 MIMO-OFDM 기술을 기반으로 하는 수중 모델을 지속적으로 연구 개발하고 있으며<sup>[6]</sup>, 본 연구팀은 선행 연구를 통해 Cortex-M3 코어를 탑재한 마이크로컨트롤러(micro-controller unit, MCU) 기반의 초소형 수중 모델을 개발한 바 있다<sup>[7]</sup>.

이 외에도, 수중 음향통신 응용 시스템의 일례로 소형 ROV에 수중 모델을 탑재하여 무선 및 실시간으로 수중 이동체를 제어하는 시스템의 시작품이 연구 개발된 바 있고<sup>[8]</sup>, 생체모방 형태의 수중 물고기 로봇에 수중 음향통신 기능을 추가하여 실시간으로 수질 정보를 취득하는 시스템이 제안되었다<sup>[9]</sup>.

본 연구에서는 초소형 수중 음향통신 모델의 성능 개선을 목표로 TMS320C6416 DSP와 STM32 MCU를 장착한 고성능 수중모뎀 디지털 모듈을 설계하고 구현한다. 또한, 본 연구를 통해 개발한 디지털 모듈

에 물리계층 알고리즘을 이식하고 선행 연구를 통해 보유하고 있는 아날로그 보드들과 연동하여 수중 통신 실험을 실시함으로써 디지털 모듈의 정상동작 여부와 성능, 향후 확장 가능성에 대해 고찰한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 선행 연구를 통해 개발한 근거리 초소형 수중 모델의 특징에 대해 서술하고, III장에서 DSP 기반의 수중 모델 디지털 부 설계 방법 및 구현 결과에 대해 상세히 논한다. 수중 패킷 통신 시스템을 위한 프레임 형성 기능의 DSP 구현 사례와 채널 부호의 DSP 구현 사례에 대해 각각 IV장과 V장에 서술하고, 끝으로 VI장에서 결론과 향후 연구 방향을 제시한다.

## II. 근거리 수중 모델 선행 연구

수중 센서노드 및 수중 로봇을 포함하는 소형 수중 디바이스에 활용하기 위해 선행 연구를 수행하여 개발한 근거리 수중 모델의 블록도를 그림 1에 나타내었다<sup>[7]</sup>. 통상적으로 수중 디바이스는 내장 배터리에 의해 구동되고 배터리 소진시 재충전 또는 교체가 수월하지 않음을 감안하여 개발된 수중 모델은 구조와 기능을 최소화하는 것을 목표로 하였다.

상기 설계 조건을 충족시키기 위해 모델 개발에 있어서 다음의 세 가지 방법을 적용하였다. 첫째, 전기 신호와 음향신호 간 상호 변환 기능을 수행하는 수중 트랜스듀서로 지름과 공진주파수는 34 mm, 70 kHz 이고 공진시 송신전압응답(transmitting voltage response, TVR) 147 dB, 수신전압응답(receiving voltage response, RVR) -200 dB를 갖는 초소형 트랜스듀서를 사용하였다. 그림 1에 나타내었듯이 상기 트랜스듀서는 구 형태를 가지며 이로 인해 무지향성 방사와 흡음의 특성을 지닌다. 둘째, 물리계층의 변복조 방식에 있어서 구조가 간단하여 소형화에 용이하고

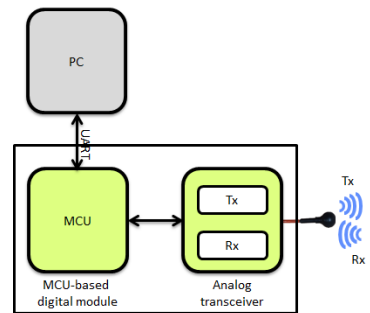


그림 1. MCU 기반 수중 모델의 블록도  
Fig. 1. Block diagram of MCU-based acoustic modem

복잡한 신호처리 과정을 필요로 하지 않는 이진 진폭 편이 변조와 포락선 검출 기법을 적용하되, 수중채널에서 발생하는 다중경로에 의한 성능 열화를 경감시키기 위해 매 심볼구간을 전송구간과 보호구간으로 분리하여 구성하였다. 끝으로 원형 기관의 복층 구조 설계를 통해 유선형 등 곡선 형태의 외관을 갖는 수중 디바이스의 협소한 공간에 탑재가 용이하도록 하였다.

데이터의 송수신시 수행되는 신호처리 과정은 다음과 같다. 범용 비동기 송수신(universal asynchronous receiver transmitter, UART) 방식에 의해 연결된 컴퓨터 또는 상위계층의 정보 데이터가 디지털 모듈로 수신되면 MCU에서 물리계층 프레임을 형성하고 디지털-아날로그 변환(digital-to-analog conversion, DAC)을 수행한다. 이어 아날로그 송신회로에서 단단계 증폭을 수행한 후 트랜스듀서에서 음파를 생성하고 송출한다. 한편, 수신시 트랜스듀서에서 감지한 음파는 전기적 신호로 변환된 후 아날로그 수신회로에서 증폭과 포락선 검출 과정을 거치게 되고, MCU에서 아날로그-디지털 변환(analog-to-digital conversion, ADC) 및 물리계층 프레임 해석을 통해 정보 데이터의 추정치를 획득하고 상위계층으로 전달한 후 작업을 종료한다. DAC와 ADC의 샘플링 속도는 MCU 내 타 작업시간 등을 고려하여 각각 4 MHz와 1 MHz로 설정하였다.

그림 2에 제작된 수중 모델을 나타내었다. 즉, 그림 2의 (a)는 좌측부터 순차적으로 아날로그 송신 모듈, 아날로그 수신 모듈, 디지털 모듈을 나타내고, (b)는 세 개의 보드를 적용 결합한 형상으로 지름 70 mm, 높이 40 mm의 규격을 갖는다. 궁극적으로, 개발된 모델 하드웨어는 구형 트랜스듀서와 연결되어 수중 모델로 완성된다.

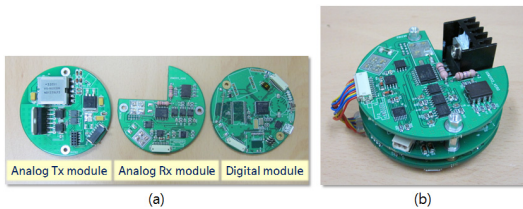


그림 2. 구현된 MCU 기반 수중 모델  
Fig. 2. Implemented MCU-based acoustic modem

### III. DSP 기반 수중 모델 설계 및 구현

#### 3.1 시스템 모델

범용 MCU는 DAC와 ADC를 포함한 다수의 주변

장치를 지니고 있어 소규모 시스템 구현에는 적합하지만 주 클럭과 연산 능력이 낮아 복잡한 알고리즘을 탑재하기는 어렵다. 한편, 수중 음향통신의 전송 속도 개선, 수신 성능 향상, 채널 오류 극복 등을 위해서는 고효율 물리계층 송수신 기법들을 적용해야만 하므로 고속 디지털 신호처리를 전담하는 DSP 활용의 필요성이 대두된다.

그림 3은 본 연구를 통해 개발하는 수중 모델의 블록도이다. 시스템 구성에 있어서 그림의 우측에 나타난 종래에 개발한 MCU 기반의 수중 모델에 DSP, RAM, ROM 등을 추가하였다. 즉, 상위계층과의 연동, 아날로그 트랜시버와의 인터페이스, DAC와 ADC 등은 MCU에서 처리하도록 하고 DSP에서는 높은 연산량을 갖는 물리계층 알고리즘 수행을 전담하게 함으로써 디지털 모듈의 효율성과 성능을 동시에 제고하도록 설계하였다.

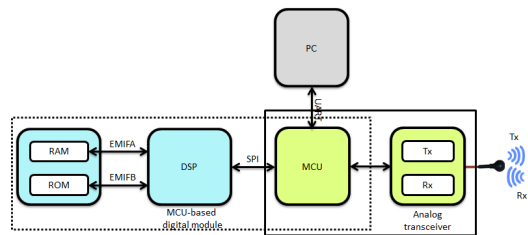


그림 3. DSP를 탑재한 수중 모델의 블록도  
Fig. 3. Block diagram of acoustic modem with DSP

#### 3.2 디지털 모듈 하드웨어

디지털 모듈의 주 프로세서로 Cortex-M3 코어를 탑재한 STM32F103을 사용하였다. 72 MHz의 클럭 속도로 동작하는 상기 MCU는 512 KB 플래쉬 메모리, 64 KB SRAM, 12비트 DAC와 ADC 등의 주변 장치들을 포함하고 있으며 UART, 직렬 주변장치 인터페이스(serial peripheral interface, SPI), 범용 직렬 버스(universal serial bus, USB) 등의 다양한 통신 인터페이스를 지원하므로 여러 장치와 연동되어 간단하면서도 다양한 기능을 수행하는 주 프로세서로 적합하다.

고속 연산용 보조 프로세서로 활용한 TMS320C6416 DSP는 고정소수점 프로세서의 일종으로 최대 1 GHz의 클럭 속도로 구동된다. 내부에 각각 16 KB 크기의 L1 프로그램 메모리와 데이터 메모리, 1 MB의 캐시 메모리를 가지고 있으며, 2개의 EMIF (external memory interface), 64 채널 EDMA (enhanced direct memory access), 3개의 MCBSP

(multi-channel buffered serial port)를 활용할 수 있다.

한편, 프레임 단위의 처리가 수행되는 고성능 물리 계층 알고리즘들은 통상적으로 대용량의 저장 공간을 필요로 하므로 DSP 내부 메모리만으로는 구현이 어려울 수 있다. 이에 DSP가 지원하는 2개의 EMIF를 활용하여 외부의 메모리, 즉, 8MB 용량의 SDRAM (MT48LC2M)과 512 KB의 플래쉬 메모리 (MX29LV)를 증설 탑재하였다.

디지털 모듈에 전원을 공급하기 위해 두 종류의 레귤레이터 회로를 설계, 구현하였다. 우선, 3.3 V와 1.4 V의 구동 전압을 필요로 하는 DSP를 위해 듀얼 채널의 출력 전압을 제공하는 TPS55386 전원부 회로를 설계하였다. 상기 회로의 입력 전압은 4.5~28 V이고 출력 전압은 입력 전압의 90% 이내에서 가능하다. 또한, 최대 3 A의 출력 전류를 지원하므로 DSP의 안정적인 동작을 보장한다. 한편, MCU에 전원을 공급하기 위해 4~5 V를 입력받아 최대 0.5 A, 3.3 V의 출력을 제공하는 MIC5219 레귤레이터 회로를 추가하였다.

그림 4는 앞서 상술한 프로세서들과 회로들로 구성된 수중 모뎀의 디지털 모듈로 기존 수중 모뎀의 아날로그 모듈과 연동이 용이하도록 직경이 70 mm인 원형 보드로 제작되었다.



그림 4. DSP 기반 수중 모뎀의 디지털 모듈  
Fig. 4. Digital module of DSP-based acoustic modem

### 3.3 디지털 모듈 인터페이스

디지털 모듈의 MCU와 DSP 간 데이터 송수신을 위해 SPI 프로토콜을 활용한 인터페이스를 구현하였다. 여기서, MCU를 마스터, DSP를 슬레이브로 설정하였고 MCU의 클럭 속도를 SPI 전송의 최대 속도로 설정하였다. 그림 5는 MCU와 DSP 간의 SPI 통신을



그림 5. DSP와 MCU의 SPI 통신 구조  
Fig. 5. Structure for SPI communication between DSP and MCU

위해 사용한 프레임 구조로, 통신의 시작과 끝을 알리는 1 바이트 필드를 각각 프레임 앞뒤에 할당하였고 프레임 길이 및 전송 데이터를 포함하여 프레임을 구성하였다.

TMS320C6416 DSP는 외부메모리 연결을 위해 두 개의 인터페이스, EMIFA와 EMIFB를 지원한다. 본 구현을 위해 선정된 SDRAM은 32 비트 워드를 가지므로 최대 64 비트 인터페이스를 지원하는 EMIFA를 사용하여 연결하였고, 8 비트 또는 16 비트 워드를 지원하는 플래쉬 메모리는 최대 16 비트 인터페이스를 지원하는 EMIFB에 연결하여 사용하였다.

한편, MCU와 상위계층 간 통신 인터페이스로는 UART 프로토콜을 사용하였다.

## IV. 프레임 형성 기능의 DSP 구현

### 4.1 물리계층 프레임 형성 및 복구

구현한 DSP 기반 디지털 모듈을 검증하고 활용하기 위해서 수중 음향통신의 송신시 물리계층의 프레임임을 형성하고 수신시 프레임을 복구하는 기능을 DSP에 할당하였다.

그림 6은 송신을 위한 물리계층 프레임 형성에 관여하는 MCU의 처리과정(MCU Process)과 DSP의 처리과정(DSP Process)을 도식화한 그림이다. MCU는 상위계층에서 생성한 정보 데이터(MAC protocol data unit, MPDU)를 UART를 통해 수신하고 SPI 연결을 활용하여 DSP로 전달한다. DSP에서는 프리앰블, SFD(start of frame delimiter), 프레임 길이 필드를 추가하여 물리계층 전송 프레임을 완성한 후 SPI 연결을 통해 MCU로 전달하고, MCU는 이를 아날로그 송신 모듈로 전달하여 수중에 음파가 방사되도록 한다. 여기서, 채널부호를 사용하지 않을 경우 MPDU와 PSDU(PHY service data unit)는 서로 동일하다. 프리앰블로는 0xAAAAAAAA 값을 갖는 4 바이트를 사용하였는데, 수신기에서 검출한 데이터 패턴과 미리 저장되어 있는 프리앰블과 비교함으로써 프레임 동기를 획득한다. 유효 프레임의 시작을 나타내는 SFD 필

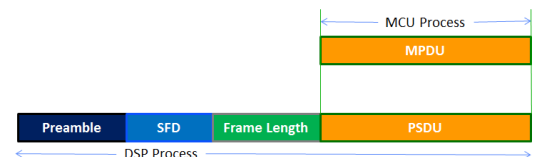


그림 6. MCU와 DSP의 송신 처리과정  
Fig. 6. Signal processing at MCU and DSP for data transmission

드로는 0xFF, 1 바이트를 사용하였고, PSDU의 길이를 나타내는 프레임 길이 필드에 1 바이트를 할당함으로써 한 개의 프레임에 실릴 수 있는 PSDU의 길이를 255 바이트로 한정하였다.

수신시 MCU와 DSP에서 처리되는 작업들을 그림 7에 나타내었다. MCU에서는 아날로그 수신 모듈에서 전달받은 신호를 활용하여 ADC 및 디지털 신호 검출을 수행하고 물리계층 프레임의 추정치를 확보한다. 그 중, PSDU를 SPI를 통해 DSP로 전달하면, DSP에서는 MPDU, 즉 PSDU를 활용하여 상위계층에서 요구하는 정보들을 생성하고 이를 다시 MCU로 전달하여 궁극적으로 상위계층에서 활용되도록 한다. 여기서, DSP에서 부가적으로 생성하는 정보는 프리미티브 종류, MPDU 길이, 링크 품질을 포함한다. 프리미티브 타입은 물리계층과 MAC 계층 간에 상호 전달되는 메시지의 타입을 정의하는 1 바이트 필드로, 기 정의된 값을 기록하여 전달함으로써 해당 프레임이 수중채널을 통해 수신된 데이터 프레임이라는 것을 알리는 기능을 수행한다. 1 바이트로 규정한 링크 품질 필드는 수신 프레임에 포함된 PSDU의 수신세기를 평균하여 생성하며 현재 채널의 상태를 상위 계층에 전달하는 기능을 수행한다.

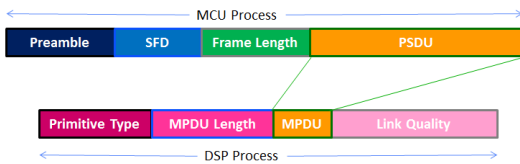


그림 7. MCU와 DSP의 수신 처리과정  
Fig. 7. Signal processing at MCU and DSP for data reception

### 4.2 실험 결과

프레임 형성 및 복구를 위한 DSP 코딩을 실시한 후 검증을 위해 수조와 연못에서 실험을 실시하였다. 실험용 수중 모델을 구성하기 위해 선행 연구를 통해 획득한 아날로그 송수신 모듈과 본 연구를 통해 신규 제작한 디지털 모듈을 결합하여 사용하였다. 실험 장소로 활용한 수조는 가로, 세로, 높이가 각각 3.0 m, 0.7 m, 0.6 m이고, 송수신 모듈의 트랜스듀서간 거리는 0.2 m로 고정하였다. 또한, 연못의 길이와 폭은 60 m, 40 m, 깊이는 최대 5 m이고, 연못 실험의 송수신 모듈간 거리는 15 m로 고정하였다. 그림 8은 수조와 연못 실험 환경을 나타내는 수중 채널 응답의 실측값이다. 수중 통신 성능 검증 실험을 위해 전송 속도는

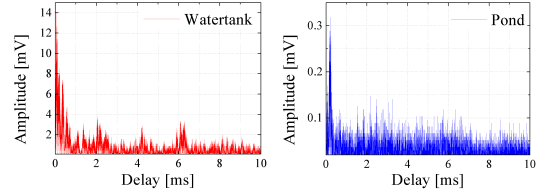
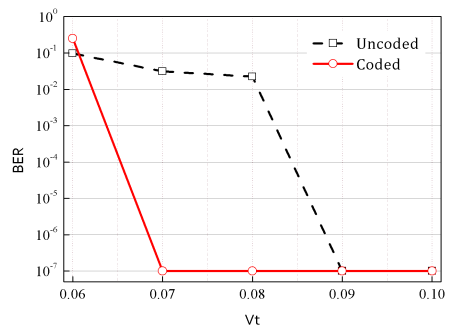


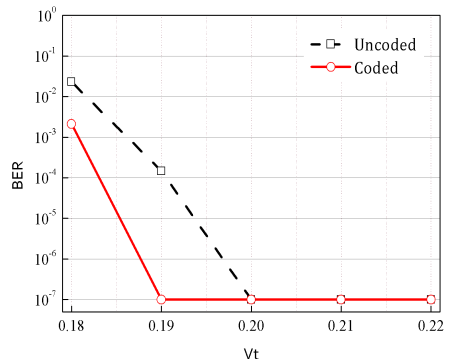
그림 8. 수중 채널 응답  
Fig. 8. Underwater channel impulse response

1 kbps로 고정하였고 송신 전압 크기를 변경하면서 수신 성능을 측정하였다. 한편, 70 kHz의 공진주파수와 1 kbps의 전송속도에서는 정보비트 '1'을 전송하기 위해 최대 70 순환 주기의 정현파를 사용할 수 있는데, 그 중 5개의 정현파만을 생성하여 활용하고 나머지 구간은 보호구간으로 남겨둬으로써 다중경로 신호에 의한 성능 열화를 줄이고자 하였다.

그림 9는 각각 수조와 연못에서 측정된 디지털 모듈에서 출력되는 전압 크기(Vt)에 따른 비트오율(bit error rate, BER) 결과 그래프이다. 여기에서, Vt는 디지털 모듈의 최종 출력 파형의 최대 전압을 나타내는 수치로 0부터 1까지 조정 가능하며 0은 0 V를 1은 3.3 V를 의미한다. 그림에서 점선으로 표시된 것이



(a) 수조실험



(b) 연못실험

그림 9. 수중 모델 성능  
Fig. 9. Performance of acoustic modem

DSP에서 프레임 형성 및 복구만을 처리할 경우의 결과이며 송신 세기를 증가시킬수록 수신 성능이 점차 개선됨을 확인할 수 있다.

## V. 채널부호의 DSP 구현

### 5.1 길쌈부호

수중 생체 및 물성 등에 기인하여 시변 주파수 선택적 특성을 갖는 수중 음향채널을 통해 전송된 데이터의 신뢰성을 높이기 위한 방법으로 채널부호의 적용이 고려될 수 있다. 이에, 본 연구를 통해 개발한 디지털 모듈의 DSP에 채널부호의 일종인 길쌈부호를 탑재하고 검증하였다. 부호율이 1/2이고 생성 다항식 {7,5}<sub>8</sub>를 갖는 길쌈부호기를 사용하였고 복호 방식으로는 비터비 복호를 적용하였다. 길쌈부호기로 입력되는 정보 데이터 MPDU의 길이는 16 바이트로 고정하였다.

DSP에서 처리되는 상세 작업은 다음과 같다. 그림 6에 나타난 것처럼 송신시 MCU로부터 정보 데이터 MPDU를 전달받으면 전송한 길쌈부호화를 수행하여 PSDU를 생성한다. 여기서, PSDU의 길이는 MPDU의 두 배가 됨을 유의한다. 그 후, 프리앰블, SFD, 프레임 길이 필드를 부가하여 물리계층 전송 프레임을 생성하고 MCU로 전달하여 수중 채널로 전송되도록 한다. 수신 과정을 그림 7을 참고로 하여 설명하면, DSP는 수신시 MCU로부터 부호화된 정보 PSDU의 추정치를 전달받는다. 그 후 비터비 복호를 수행하여 MPDU의 추정치를 획득하고, 여기에 프리미티브 종류, MPDU 길이, 수중 채널 품질 필드를 추가하여 MCU로 전달한다.

### 5.2 실험 결과

길쌈부호가 탑재된 디지털 모듈의 수조와 연못 실험 결과를 그림 9에 실선으로 표기하였다. 결과에 따르면, 송신 세기를 증가시킬수록 수신 성능이 개선된 것은 물론 채널부호를 사용하지 않은 경우에 비해 상당한 성능 개선 효과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

구축된 디지털 모듈의 연산 전용 프로세서로 활용되는 DSP의 연산량을 분석하기 위해 정보 데이터의 길이가 16 바이트인 길쌈부호 수행을 위해 DSP에서 소요되는 실측 처리시간과 예상 프로세서 점유율을 표 1에 나타내었다. 타이머를 활용하여 길쌈부호화 처리시간과 비터비 복호 처리시간을 측정하고, 각각 55  $\mu$ s와 607  $\mu$ s가 필요함을 관측할 수 있었다. 한편, 길쌈부호기, 복호기의 연산량은 정보 데이터의 길

표 1. DSP 연산량 분석

Table 1. Computational power analysis of DSP

	Conv. encoding	Viterbi decoding
Processing time per frame	55 $\mu$ s	607 $\mu$ s
Processing time per bit	0.430 $\mu$ s	4.742 $\mu$ s
Processor occupancy (1kbps)	0.0430%	0.4742%

이에 정비례하므로 프레임 처리시간을 정보 데이터 길이로 나누어 단위 비트당 처리시간을 환산하였다. 일례로, 전송속도 1 kbps를 제공하기 위한 부호화 및 복호화에 0.430 ms와 4.742 ms의 시간이 소요될 것으로 예상되며, 해당 작업을 위한 프로세서 점유율은 각각 0.0430%, 0.4742%에 불과하다. 따라서, 필요시 고속 길쌈부호의 수행 및 고성능 물리계층 알고리즘 탑재가 용이할 것으로 예상된다.

## VI. 결 론

본 연구를 통해 초소형 수중 음향통신 모듈의 디지털 모듈을 설계하고 구현하였다. 개발되는 모듈의 효율성과 성능을 증대시키기 위해 여러 장치와의 연동 및 제어 기능은 MCU에 할당하였고 고성능 물리계층 알고리즘 처리는 DSP가 전담하도록 하였다. 물리계층 프레임 생성 및 복구 기능과 길쌈부호기 및 복호기를 DSP에 구현하였으며 수조와 연못에서 실험을 수행함으로써 개발된 디지털 보드의 기능과 성능을 검증, 분석하였다.

개발된 DSP 기반 디지털 모듈의 연산량 분석에 따르면 1 kbps 전송 속도를 지원하는 길쌈부호 처리를 위해 요구되는 연산량이 DSP의 가용 연산 능력의 1% 이내에 불과하다. 따라서, 향후 터보부호, OFDM, 채널 추정 및 보상 기법 등의 알고리즘들을 구축된 DSP 기반 하드웨어 플랫폼에 탑재하는 연구를 수행함으로써 수중 모듈의 성능 향상을 모색할 수 있을 것으로 기대된다.

## References

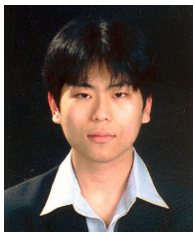
[1] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "Underwater acoustic sensor networks: research challenges," *Ad Hoc Netw.*, vol. 3, pp. 257-279, Mar. 2005.

[2] J. Heidemann, W. Ye, J. Wills, A. Syed and Y. Li, "Research challenges and applications

for underwater sensor networking,” in *Proc. IEEE Wirel. Commun. Netw. Conf. (IEEE WCNC)*, pp. 228-235, Las Vegas, NV, Apr. 2006.

- [3] L. Vasilescu, C. Detweiler, and D. Rus, “AquaNodes: an underwater sensor network,” in *Proc. ACM Int. Conf. Underwater Netw. Syst. (ACM WUWNET)*, Montreal, Canada, Sept. 2007.
- [4] <http://acomms.who.edu>
- [5] <http://www.tritech.co.uk>
- [6] H. Yan, L. Wan, S. Zhou, Z. Shi, J.-H. Cui, J. Huang, and H. Zhou, “DSP based receiver implementation for OFDM acoustic modems,” *Physical Commun.*, vol. 5, no. 1, pp. 22-32, Mar. 2012.
- [7] J.-H. Jeon and S.-J. Park, “Design and implementation of an acoustic modem for small underwater devices operating at shallow water,” *J. IEET*, vol. 49, no. 11, pp. 110-117, Nov. 2012.
- [8] G.-J. Kim and S.-J. Park, “A wireless remotely operated vehicle using acoustic communication,” *J. Marine Technol. Soc.*, vol. 46, no. 3, pp. 44-49, May/June 2012.
- [9] J.-H. Jeon, N.-Y. Yun, H. Nam, C.-G. Hong, S.-J. Park, S.-H. Park, S. An, C.-H. Kim, G.-H. Yang, and Y.-S. Ryuh, “A moving underwater communication system with bio-inspired fish robots,” in *Proc. ACM Int. Conf. Underwater Netw. and Syst. (ACM WUWNET)*, Los Angeles, CA, Nov. 2012.

**이 동 수 (Dongsoo Lee)**



2009년 2월 : 강릉원주대학교 전자공학과 학사  
 2013년 8월 : 강릉원주대학교 전자공학과 석사  
 2013년~현재 : 강릉원주대학교 해양센서네트워크시스템기술 연구센터 연구원

<관심분야> 임베디드시스템, 디지털신호처리, 통신시스템

**이 상 민 (Sangmin Lee)**



1986년 : 서울대학교 제어계측공학과 학사  
 1990년 : M.S., EE, Univ. of Michigan  
 1993년 : Ph.D. EE, Univ. of Michigan  
 1994년~현재 : 강릉원주대학교 전자공학과 교수

<관심분야> 디지털 통신 시스템, 부호 및 정보이론

**박 성 준 (Sung-Joon Park)**



1996년 2월 : 연세대학교 전파공학과 학사  
 1998년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사  
 2004년 2월 : 한국과학기술원 전자전산학과 박사  
 2003년 09월~2005년 03월 : 삼성전자 정보통신연구소 책임연구원

2005년 04월~현재 : 강릉원주대학교 전자공학과 부교수

<관심분야> 이동 통신, 수중 음향통신, 통신 시스템 설계, 무선 센서네트워크 시스템