

장거리 수중음향 네트워크 프로토콜 구현

조아라*, 윤창호*, 김승근*, 임용곤*, 서수진*, 최영철°

Implementation of a Long-Range Underwater Acoustic Network Protocol

A-ra Cho*, Changho Yun*, Seung-geun Kim*, Yong-kon Lim*, Sujin Seo*, Youngchol Choi°

요약

수중에서는 원거리 전달이 가능한 음파가 무선 통신의 가장 중요한 수단 중의 하나이다. 하지만 음파의 느린 전달 속도는 수중음향 네트워크의 종단간 시간 지연을 증가시킬 뿐만 아니라 네트워크 수율을 저하시킨다. 본 논문에서는 홉간 통신 거리가 최대 30 km인 장거리 수중음향 네트워크를 구현한다. 구체적으로, 음파의 느린 전달 속도로 인하여 발생하는 시간 지연 증가 및 수율 저하 문제점을 개선할 수 있는 매체접속제어, 동기화, 라우팅 프로토콜을 통합·연동하는 수중음향 장거리 네트워크 소프트웨어를 구현한다. 이를 위해 물리계층과 네트워크 인터페이스를 설계하고, 데이터링크계층, 네트워크계층, 응용계층으로 구성된 네트워크 프로토콜을 리눅스 기반의 소프트웨어로 구현한다. 또한, 리눅스 기반 네트워크 소프트웨어를 제어하고 운용하기 위한 사용자 GUI 소프트웨어를 구현한다. 구현된 장거리 수중음향 네트워크 소프트웨어의 기능 검증을 위하여 물리 계층을 소프트웨어적으로 에뮬레이션하고 각 계층별로 시나리오를 구성하여 계층별 프로토콜의 핵심기능을 확인한다.

Key Words : Software implementation, Underwater acoustic networks, Medium access control, Routing, Synchronization

ABSTRACT

Acoustic wave is one of the most important media for long-range underwater wireless communications. However, the low propagation speed of sound not only increases the latency of a underwater acoustic network (UANet) but also degrades network throughput. In this paper, we implement a long-range UANet for the one-hop communication distance of up to 30 km. The implemented long-range UANet consists of medium access control protocol, time synchronization protocol, and routing protocol, which can improve the latency performance and mitigate the throughput degradation caused by the low sound speed. We design an interface between physical layer and upper layers, and we implement the long-range UANet as a Linux-based software. Graphic user interface (GUI) is also implemented to control and operate the Linux-based network software. In order to verify the function of the implemented UANet software, the physical layer is emulated by a software program and the scenarios are configured for each layer to confirm the core functions of each protocol.

※ 본 연구는 해양수산부의 국가연구개발사업인 “수중 광역 이동통신 시스템 기술개발”에 의해 수행되었습니다(PMS3710).

♦ First Author : Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO), zoazoa@kriso.re.kr, 정희원

° Corresponding Author : KRISO, ycchoi@kriso.re.kr, 정희원

* KRISO, sgn0178@kriso.re.kr, sgkim@kriso.re.kr, yklim@kriso.re.kr, ssj@kriso.re.kr

논문번호 : KICS2017-09-269, Received December 4, 2017; Revised January 5, 2018; Accepted February 20, 2018

I. 서 론

해양에 대한 관심이 높아지고 정보통신의 발달로 해양정보통신 기술 분야의 연구가 활발히 진행되고 있다. 수중 센서 및 수중 이동체(autonomous underwater vehicle (AUV), remotely operated vehicle (ROV), 잠수함 등)와 같은 수중 노드들을 이용한 네트워킹 기술을 활용하면, 해양환경모니터링, 해저지형탐사, 해난 구조, 수중기뢰탐지 및 해양방위 분야 등에서 보다 복잡하고 다양한 수중작업이 가능하^{1,2}). 이와 같은 다양한 실제 해양 환경에서 수중 네트워크가 활용되기 위해서는 수중네트워크의 고유한 특성을 고려해야 한다.

육상에서 통신 수단으로 널리 활용되는 전자기파 및 빛 등은 물속에서 급격한 감쇠로 인하여 100 m 이내의 단거리 고속 통신의 용도 외에는 활용되지 않는다. 반면에, 음파는 수중에서 원거리 전파가 가능하여 대부분의 수중 무선통신 시스템은 음파를 활용한다. 하지만, 물속에서 음파의 전달 속도는 1,500 m/s로서, 전자기파나 빛에 비해서 이십만 배가 느리다. 이러한 느린 전달 속도는 종단간 시간 지연 증가 및 네트워크 수율 저하의 가장 큰 요인이다. 이외에도 낮은 데이터 전송속도, 높은 패킷 손실율, 배터리 동작 등과 같은 육상 무선 네트워크 대비 제약 조건을 지닌다^{1,4}). 이와 같은 수중 네트워크 특성과 극지나 심해와 같은 해양환경 등과 같은 지역적 특성 및 응용 분야를 고려한 수중 네트워크 분야의 연구가 활발히 진행되고 있다.

구체적으로, 장거리 수중음향 채널에 대한 실험적 시험 및 결과 분석⁵), 장거리 수중통신 모뎀용 신호처리 플랫폼 구현⁶), 수중노드의 위치정보를 활용한 시분할방식의 수중 장거리 네트워크 매체접속제어(MAC: Medium Access Control) 프로토콜⁷), 홉 거리를 최소화하여 종단간 패킷 수신율을 향상시킨 라우팅 프로토콜⁸), 누적 수신된 패킷의 수신 시각차이를 이용한 동기화 프로토콜을 포함하는 장거리 수중네트워크 설계 및 구현⁹) 등에 관한 연구 결과가 발표되었다.

본 논문에서는 홉간 최대 통신 거리가 30 km인 장거리 수중음향 네트워크 형성을 목표로 연구된 각 계층별 프로토콜⁷⁻⁹)을 통합 연동하기 위한 인터페이스를 설계하여 장거리 수중음향 네트워크를 소프트웨어로 구현한다. 또한, 장거리 수중음향 네트워크를 운용하기 위한 사용자 GUI와 응용 프로그램을 구현한다. 구현된 장거리 수중음향 네트워크 프로토콜은 물리계층의 소프트웨어적 에뮬레이터를 통한 성능시험을 통

해 매체접속제어, 동기화, 라우팅 등의 기능을 검증하여 장거리 수중음향 네트워크 적용 가능성을 확인한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 구현하고자 하는 장거리 수중네트워크의 구성 및 계층별 프로토콜에 대해 간략히 요약하고, 제 3장에서는 장거리 수중네트워크 구현 결과와 성능검증 결과에 대해 논한다. 마지막으로 제 4장에서 논문을 마무리 짓는다.

II. 장거리 수중네트워크 개요

본 장에서는 구현하고자 하는 장거리 수중 네트워크의 타겟 어플리케이션과 물리계층과 상위계층에 적용된 통신 및 네트워크 기술에 대해 간략히 논하도록 한다.

2.1 장거리 수중네트워크 구성

장거리 수중네트워크는 그림 1과 같이 1대의 중앙 모선(CS: Command Ship)과 다수의 클러스터 헤더(CH: Cluster Header)로 구성된다.

CS는 해상에 위치하여 전자기파통신과 수중음향통신이 가능하며, GPS(Global Positioning System)와 연동되어 자신의 위치 정보를 지속적으로 갱신하고 CH의 참조클럭(Reference clock)이 된다. 또한, CS는 비콘을 통해 주기적으로 브로드캐스팅하여 CH에 클럭정보와 전송 스케줄링 정보를 제공하고, 수중작업에 필요한 제어 메시지를 전송한다.

CH는 주기적으로 AUV, ROV, 잠수함 등과 같은

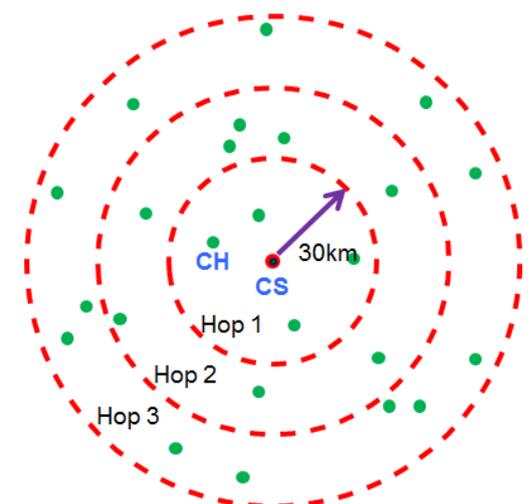


그림 1. 장거리 수중음향 네트워크 토폴로지
Fig. 1. Topology of long range underwater acoustic networks.

수중 이동체로 수중이동체의 생존을 위한 정보(노드 위치, 배터리 잔량, 임무진행 상황)를 전송하고, 해저 지형 정찰, 지형 매핑, 해양데이터 취득과 같은 임무를 수행한다. CH는 CS와의 통신범위를 벗어나면 최대 3-홉까지의 멀티홉 라우팅을 통해 CS에 정보를 전송한다.

장거리 수중음향 네트워크를 위한 수중음향 통신 모뎀은 최대 전송거리가 30km, 주파수 대역은 5-8 kHz 이고, 차동 위상 변조 기반의 확산대역 통신 방식을 통해서 100bps 전송 속도의 사양을 갖는다⁶⁾.

2.2 장거리 수중네트워크 프로토콜(상위계층)

본 논문에서 구현하고자 하는 장거리 수중음향 네트워크의 프로토콜은 다음과 같다.

MAC 프로토콜: 장거리 수중네트워크를 위해 매체접속제어로 위치기반 시분할 매체접속제어 방식인 GSR-TDMA(Geometric Spatial Reuse-Time Division Multiple Access)⁷⁾ MAC 프로토콜을 적용한다. GSR-TDMA는 초기화 과정을 통해 CS노드가 CH노드들의 위치 정보를 수집하고 노드들의 위치정보 지도를 형성하여 홉을 설정한다. 노드의 홉은 인트라 홉내 서브홉과 인터홉 간의 그룹을 설정하여, 동일한 홉 내에서도 충돌없이 동시전송이 가능하도록 시간파라미터를 설정하여 데이터전송을 위한 공간 재사용율을 높인다.

동기화 프로토콜: 수신패킷의 누적된 수신시각 차이를 이용한 동기화 프로토콜⁸⁾을 적용한다. 수중의 긴 전파지연을 고려하여 CS노드의 비콘 브로드캐스팅과 CH노드의 하향링크 데이터 패킷을 이용한 단일방향 통신방식으로 동기화를 진행한다. 이는 별도의 동기화를 위한 과정을 생략하고 양방향통신방식으로 인한 지연시간을 최소화한다. 송신노드는 비콘 또는 하향링크 데이터 패킷에 전송시각을 실어 패킷트레인 형태로 전송하면 수신노드는 연속해서 수신된 패킷의 수신시각 차이를 이용하여 클록의 스큐와 오프셋을 계산한다. 다중홉 동기화의 경우 수신패킷의 홉번호를 비교하여 홉에 따라 동기화를 실시한다. 도출된 클록 스큐와 오프셋을 토대로 로컬클록 시간을 갱신한다.

라우팅 프로토콜: 홉 간의 거리정보를 토대로 홉 간 최대거리가 가장 작은 경로를 우선순위로 두고 경로를 결정하는 라우팅⁹⁾ 방식이다. CH 노드에서 CS 노드로 데이터 전송을 위한 상향링크 라우팅은 CS노드가 CH노드들에게 전송하는 패킷을 통해 이루어진다. 상향링크 라우팅은 송신 노드 주소, 송신 노드 위치, 홉 수, 홉 간 최대 거리 정보를 이용한다. 우선순

위가 가장 높은 경로는 홉 수가 적으면서 홉 간 최대거리가 가장 짧은 경로이다. 반대로 CS 노드에서 CH 노드로 데이터 전송을 위한 하향링크 라우팅은 CH 노드들이 CS 노드에게 전송하는 패킷을 통해 이루어지며, 전송패킷에 송신 노드와 홉 수 정보만을 추가하여 도달 가능한 모든 경로를 설정하므로 오버헤드를 최소화한다.

III. 장거리 수중 네트워크 구현

본 장에서는 장거리 수중네트워크를 위해 구현한 응용 소프트웨어 구조, 계층별로 구현된 프로토콜과 이를 통합연동하기 위해 구현된 사용자 GUI에 대해 소개한다.

3.1 장거리 수중네트워크의 응용 소프트웨어 구조

그림 2는 장거리 수중네트워크의 응용 소프트웨어 구조로서 수중네트워크 운용 GUI (UANet GUI)와 수중네트워크 소프트웨어로 구분된다.

UANet GUI 소프트웨어는 윈도우 기반의 프로그램으로 동작하고, 계층별 (물리계층, 데이터링크계층, 네트워크계층, 응용계층) 모니터링 및 시스템 설정, 프로토콜 설정, 데이터입출력 등의 기능이 포함된다.

수중 네트워크 소프트웨어는 리눅스기반의 프로그램으로 동작하며, 수중네트워크 운용 소프트웨어 (UANet operating S/W), 네트워크 디버깅 및 모니터링을 위한 소프트웨어(UANet monitoring S/W), 물리계층 에뮬레이터 S/W(UANet emulating S/W), UANet GUI 인터페이스를 위한 소프트웨어(GUI IF S/W) 등과 같이 4개의 프로그램 모듈로 구성된다.

UANet operating S/W: 장거리 수중네트워크를 위한 각 계층별 프로토콜 기능을 수행하면서 1개의 CS 노드 프로그램과 최대 63개의 CH 노드로 구성된 프로그램이 독립적으로 구동된다. 각 노드 프로그램은 UANet emulating S/W와 정합되고, GUI IF S/W를 통해 UANet GUI와 UANet monitoring S/W에 각각 정합되며, 별도의 하드웨어 장치에서 동작하는 물리계층과 정합된다.

UANet monitoring S/W: CS 및 CH 노드 프로그램의 동작을 제어하고 모니터링을 하는 프로그램으로 개발자를 위한 디버깅 및 모니터링을 위한 메뉴 기능을 갖는다.

UANet emulating S/W: 각 노드 프로그램 간 무선인터페이스를 에뮬레이션하는 프로그램으로 각 노드들의 수중 위치에 따른 노드 간 음파의 전파지연 시

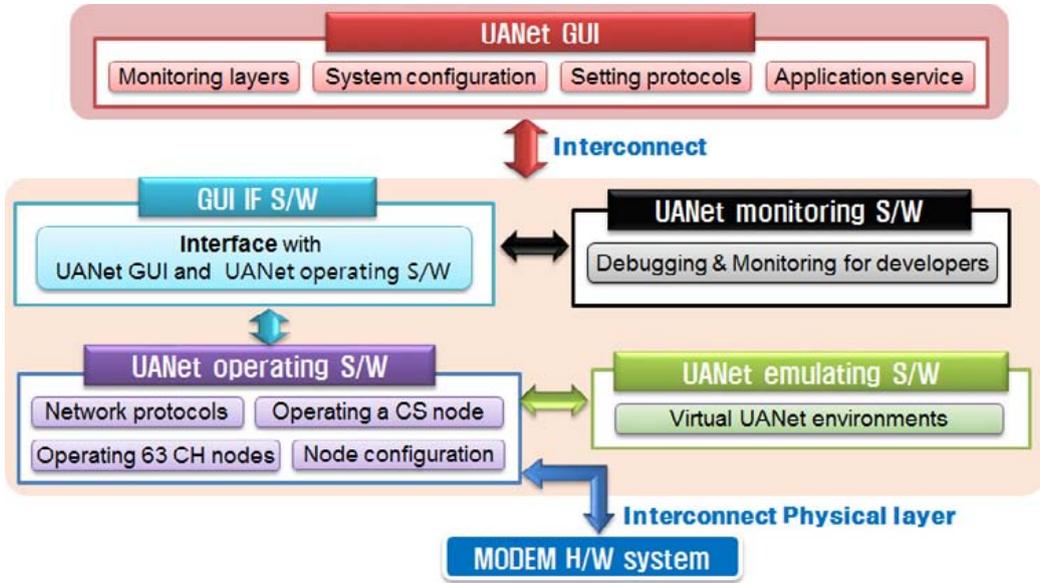


그림 2. 장거리 수중네트워크의 응용 프로그램 구조
 Fig. 2. The application program architecture for long range underwater acoustic networks

간을 부여하고 멀티캐스트 기능을 제공한다.

GUI IF S/W: UANet GUI와 UANet operating S/W 간의 정합을 위한 스위치 기능을 제공한다.

3.1.1 UANet operating S/W

그림 3은 UANet operating S/W에 존재하는 프로그램 블록 흐름도를 보여준다. 그림3에서 실선은 블록 간 메시지-큐 기반으로 통신을 하며, 점선은 함수기반의 통신을 나타낸다.

GIF (Graphic InterFace)블록은 프로그램에 존재하는 프로토콜 블록과 GUI S/W 프로그램 간 정합을 담

당하며 이를 위하여 GUI IF S/W와 UDP/IP 기반으로 통신을 한다.

UL(Upper Layer)블록은 GUI S/W 프로그램에서 송신하는 응용 서비스 데이터를 수신하여 특정 UANet 노드로 송신하기 위하여 MAC 블록에게 전달하며 특정 UANet 노드로부터 수신된 응용 서비스 데이터를 MAC 블록으로부터 수신하여 GUI S/W 프로그램으로 전달한다. NL(Network link Layer)은 UANet 노드 간의 데이터 송신을 위한 라우팅 기능을 수행한다. MAC 블록으로부터 라우팅 처리를 위한 정보를 수신하여 상-하향링크 라우팅 테이블을 생성한다. 생성된 라우팅 테이블을 관리하며 MAC 블록으로 상-하향링크 라우팅을 위한 함수를 제공한다.

TS(Time Synchronization)블록은 UANet 노드 간의 시간동기 기능을 수행한다. MAC 블록으로부터 시간 동기 처리를 위한 시간 정보를 수신하여 시간동기 처리를 수행하여 skew 및 offset 값과 로컬 시간을 이용하여 갱신된 로컬 시간을 생성한다. 생성된 로컬 시간 정보는 MAC 블록으로 전달되어 MAC 블록이 로컬 시간 갱신을 하는 데 제공한다.

MAC 블록은 UANet 노드 간 매체접속을 위한 시간 스케줄링을 하며 MAC 프레임 및 데이터링크 계층(DL: Datalink Layer) 프레임의 생성 및 처리를 수행한다. MAC 블록은 CS 노드 및 CH 노드 기능을 수행하고 CS 노드만이 시간 스케줄 기능을 수행한다. 또

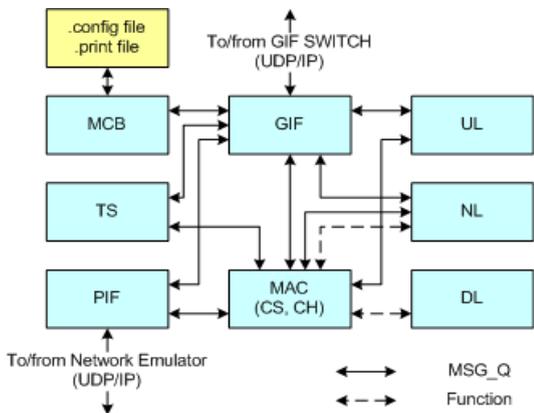


그림 3. UANet operating S/W의 프로그램 블록 흐름도
 Fig. 3. The flow chart for blocks in UANet operating S/W

한 라우팅 정보 획득을 위해 NL 블록이 제공하는 함수를 이용하며, UL 블록과 응용서비스 송수신 통신을 하고 PIF 블록과 물리계층 송수신을 위해 정합한다.

DL블록은 MAC블록과 함수기반으로 정합하며 DL 프레임의 Encoding 및 Decoding 기능을 제공한다.

PIF(Physical InterFace) 블록은 물리계층과의 정합 기능을 제공하며, 현재는 물리계층을 에뮬레이션하는 UANet emulating S/W 프로그램과 정합하여 UDP/IP 기반으로 통신한다.

MCB(Memory Control Block)는 UANet operating S/W 블록들의 Task를 생성·삭제하고, CH 노드 프로그램을 구동 및 종료한다. 또한, 노드별 구성 파일을 읽어 시스템 정보를 설정한다.

3.1.2 UANet emulating S/W

그림 4는 UANet emulating S/W의 프로그램 블록 흐름도를 나타낸다. VPHY (Vitual PHY) 블록은 UANet operating S/W 프로그램(CS 및 다수의 CH)과의 정합을 수행하며 UDP/IP 기반으로 통신을 하며 UDP 수신을 쓰레드 기반 task를 생성한다. MCB 블록은 VPHY task를 생성하고, cs.config 파일에 저장된 노드별 UDP/IP 정보 파라미터를 이용하여 통신 에뮬레이션 정보를 생성하여 VPHY 블록에 함수로 제공한다.

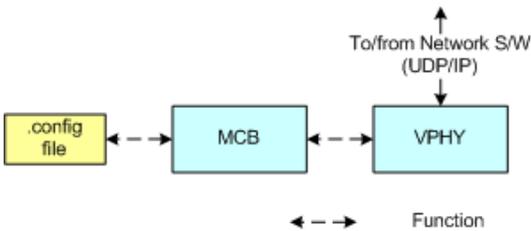


그림 4. UANet emulating S/W의 프로그램 블록 흐름도
Fig. 4. The flow chart for blocks in UANet emulating S/W

3.1.3 GUI IF S/W

그림 5는 GUI IF S/W의 프로그램 블록 흐름도를 나타낸다. GIF 블록은 UANet operating S/W 프로그램과의 정합을 수행하며 TCP/IP 기반으로 TCP 서버 역할을 수행하고, NIF(Network InterFace) 블록으로부터 수신된 데이터를 GUI S/W 프로그램으로 전달한다. NIF 블록은 CS 및 다수의 CH노드와의 정합을 수행하며 노드 구별자와 IP주소 및 UDP 포트를 맵핑한다. MCB블록은 GIF 블록 및 NIF 블록의 task를 생성하고 *.config 파일에 저장된 IP주소 및 UDP 포트

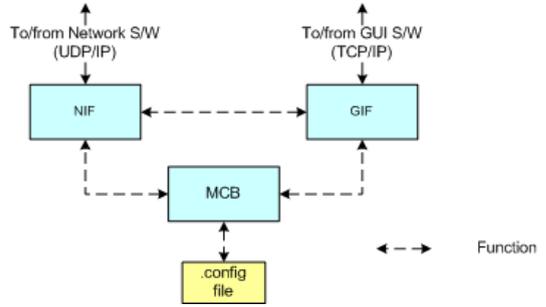


그림 5. GUI IF S/W의 프로그램 블록 흐름도
Fig. 5. The flow chart for blocks in GUI IF S/W

정보를 이용하여 NIF 및 GIF 블록에 함수 형태로 제공한다.

3.1.4 UANet monitoring S/W

그림 6은 UANet monitoring S/W의 프로그램 블록 흐름도를 나타낸다. NIF 블록은 GUI IF S/W 정합을 수행하며 TCP/IP 기반으로 통신하며 TCP 클라이언트 역할을 수행한다. NIF 블록에서 수신된 GUI 데이터는 Menu 블록으로 전달되며, Menu 블록에서 송신하는 데이터를 GUI IF S/W 프로그램으로 전달한다. Menu 블록은 UANet operating S/W 프로그램과 정합을 통해 제어 및 모니터링을 위한 메뉴기능을 수행한다.

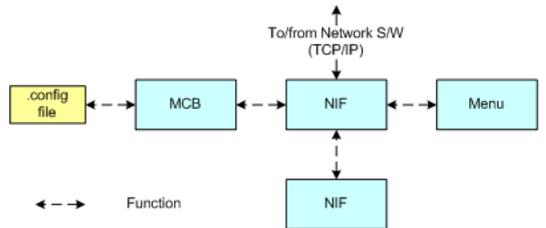


그림 6. UANet monitoring S/W의 프로그램 블록 흐름도
Fig. 6. The flow chart for blocks in UANet monitoring S/W

3.2 장거리 수중음향 네트워크 소프트웨어의 계층별 구현

그림 7은 장거리 수중음향 네트워크 소프트웨어의 계층별 구현 내용이다. 장거리 수중음향 네트워크 소프트웨어는 물리계층 인터페이스, 데이터 링크 계층, 네트워크 계층, 응용 계층으로 구분된다.

응용 계층: 응용 계층에서는 장거리 수중네트워크를 위한 응용 서비스로 CS와 CH의 노드분포도와 위치이력(trajjectory) 정보를 제공하고, 연속된 문자열을 전송하는 기능과 UANet GUI를 포함한다. 그림 8은 UANet GUI이다. GUI 화면을 통해 계층별로 모니터

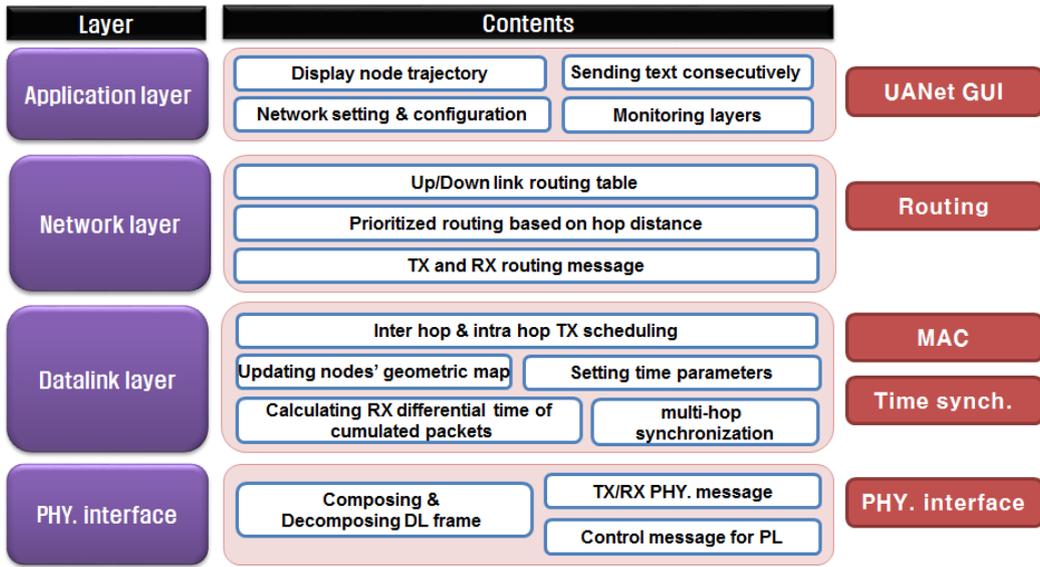


그림 7. UANet 프로그램의 계층별 구현 내용
Fig. 7. The implemented UANet S/W contents according to layers

링(그림 8(a)) 및 해당 계층의 프로토콜의 파라미터를 설정(그림 8(b))할 수 있다. 그림 8(a) 화면은 UANet GUI와 수중 네트워크 소프트웨어의 연동(①), 프로그램 실행을 위한 시스템 설정(②), 계층별 파라미터 설정(③), 프로그램 연결 상태정보(④), 현재 시각정보(⑤)를 표시한다. UANet GUI에서 송신하는 응용 계층 데이터는 GUI IF S/W를 통해 UDP 방식으로 UANet operating S/W에 전달된다.

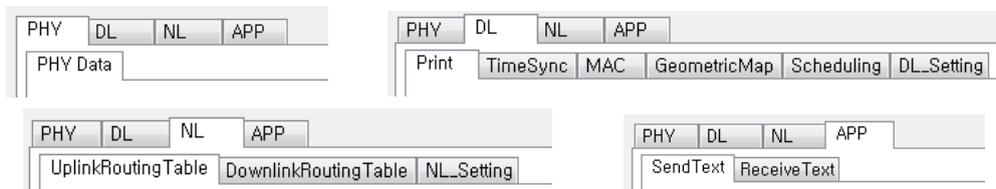
네트워크 계층: 네트워크 계층에서는 수중 노드간

데이터 송수신을 위한 경로설정을 위한 라우팅 기능을 포함한다. 하위계층인 DL에서 라우팅 처리를 위한 RIM(Routing Initiate Message), PRM(Periodic Routing Message) 메시지정보^[9]를 수신하여 상/하향 링크 라우팅 테이블을 생성한다. 생성된 라우팅 테이블을 관리하며, 응용계층에서 수신된 데이터에 라우팅 정보를 헤더로 추가하여 DL에 전달한다.

DL 계층: DL 계층은 시간동기화 기능과 노드 간 충돌을 막고 통신방식을 결정하는 MAC 기능을 포함



(a) UANet GUI 주요 메뉴
(a) Main menu of UANet GUI



(b) 각 계층별 UANet GUI 메뉴
(b) Menus of each layer on UANet GUI

그림 8. UANet GUI 화면
Fig. 8. Display of UANet GUI

하고, MAC 프레임 및 DL 프레임의 생성 및 처리를 담당한다. MAC에서는 CS 노드가 CH 노드로부터 수신한 위치정보를 활용하여 위치정보 지도를 생성하여 관리하고, 이를 기반으로 인터홉/인트라홉 스케줄링을 수행한다. 시간 동기화는 CH 노드별로 수신된 MAC 프레임의 시간정보를 추출하고 저장하여 누적된 시간정보를 활용함으로써 해당 CH노드의 클록 스큐와 오프셋을 도출하고 로컬클록시간을 갱신하여 생성한다. MAC에서 갱신된 로컬클록시간을 노드의 송수신 스케줄링 시각에 적용하고, MAC 프레임을 생성한다. MAC 프레임임을 기반으로 물리 계층(PL: Physical Layer)과의 인터페이스를 위한 DL 프레임을 생성하여 물리 계층에 전달한다.

PL 인터페이스: 그림 9는 DL 프레임 구조이다. 헤더와 테일, 최대 8개의 MAC 프레임들로 구성되며, DL 프레임의 길이는 1024-bit이다. 헤더는 조각된 DL 프레임의 총 개수(DL_LEN), 조각된 DL 프레임 조각번호 (DL_Num)로 구성되며 길이는 8-bit이다. 테일은 DL 프레임의 CRC(Cyclic Redundancy Check) 값으로 길이는 16-bit이다. 페이로드에는 125-bit 길이의 MAC 프레임이 최대 8개까지 가능하다.



그림 9. DL 프레임 구조
Fig. 9. The structure of a DL frame

표 1. DL에서 PL로 전달되는 제어명령
Table 1. Description of commands from DL to PL

Command	Description
0 Query_Modem_Aval	Inquiry of MODEM availability
1 Set_Mode_Bitfield	Request setting Mode_Bitfield
2 Set_PHY_CH	Request setting PHY. channel
3 PHY_parameter_request	Request parameter value of PHY. channel
4 PHY_parameter_change	Request changing PHY_CH parameter
5 PHY_RTC_request	Request real time value of a MODEM
6 TX_downlink_data	Sending DL frame from DL to PL

PL과 DL은 서로 다른 프로세서에서 동작하며, 두 개의 프로세서는 공통으로 접근 가능한 메모리 영역인 DPRAM(Dual-ported RAM)을 통해 PL과 DL 간의 송수신 데이터와 제어 메시지를 교환한다. DPRAM에서 상향 데이터(PL에서 DL로 전송) 연속 전송을 위해 이중 버퍼 구조를 사용하며, 하향 데이터(DL에서 PL로 전송)는 단일 버퍼 구조를 사용한다.

DL과 PL 간의 제어메시지는 DL에서 생성하고 PL은 이에 대한 제어응답만 가능하며, DL에서 PL로 정의되는 제어명령은 표 1과 같다.

3.3 장거리 수중네트워크 프로그램 검증

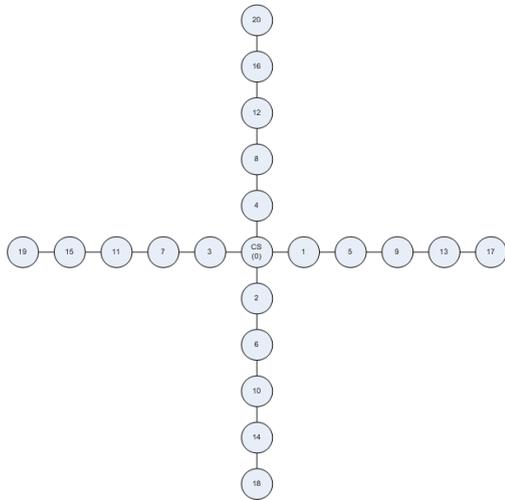
장거리 수중네트워크 프로그램 기능 검증을 위해, 장거리 수중통신 모델 플랫폼연동 대신 물리계층을 에뮬레이션하는 UANet emulating S/W와 정합하여 장거리 수중네트워크 프로그램을 구동한다. 에뮬레이션 프로그램 정합 시 UDP/IP 방식을 적용한다. 그림 10은 구현 프로토콜 기능검증을 위한 시나리오 및 토폴로지이며, CS 노드를 제외한 나머지 모든 노드는 CH 노드를 나타낸다. 설명의 용이성을 위해 CH 노드들은 각 시나리오마다 다르게 표시되며, CS 노드와 각 CH 노드들은 동일 PC 내에서 독립적으로 프로그램이 구동되어 시나리오에 따라 네트워크 통신을 수행한다. 구현된 프로토콜은 그림 10(a)~(c)에 대해 모든 기능검증을 수행하였으며, 본 논문에서는 프로토콜의 특성을 고려하여 대표적인 시나리오에 대한 검증 결과를 서술한다.

3.3.1 MAC 프로토콜

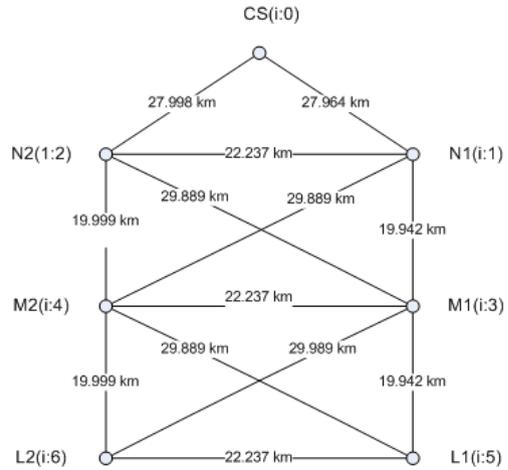
MAC 프로토콜 기능검증 토폴로지는 그림 10(a)와 같이 1 개의 CS 노드와 20 개의 CH 노드로 구성되어 최대 5 홉 통신을 수행한다. 또한 5회의 전송스케줄을 갖는데, 첫 번째 주기는 초기화단계, 2-4번째 주기는 normal 단계, 5번째 주기는 종료단계를 거친다.

그림 11은 MAC 프로토콜 기능검증 결과를 UANet GUI에서 캡처한 것이다.

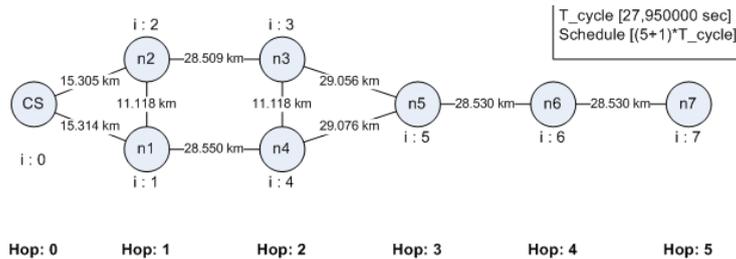
CH노드 위치정보와 CH노드별 스케줄링 정보, CH 노드별 상태정보 테이블 정보를 보여준다. 초기화 과정을 거치면서 CS노드는 각 CH 노드위치 정보를 수집하여 위치정보지도를 형성하고, 그에 따라 홉과 서브홉을 구분하여 인터홉/인트라홉 간의 전송 스케줄을 결정한다. Normal 단계에서 CS노드는 비콘을 통해 전송스케줄 정보를 브로드캐스팅하고 각 CH노드는 자신의 해당 스케줄에 따라 데이터와 위치정보를 전송한다.



(a) MAC 프로토콜 기능검증 시나리오
(a) Test scenario for the MAC protocol



(c) 라우팅 프로토콜 기능검증 시나리오
(c) Test scenario for the routing protocol



(b) 동기화 프로토콜 기능검증 시나리오
(b) Test scenario for the synchronization protocol

그림 10. 계층별 프로토콜 기능검증 시나리오
Fig. 10. Test Scenarios for the protocols of each layer

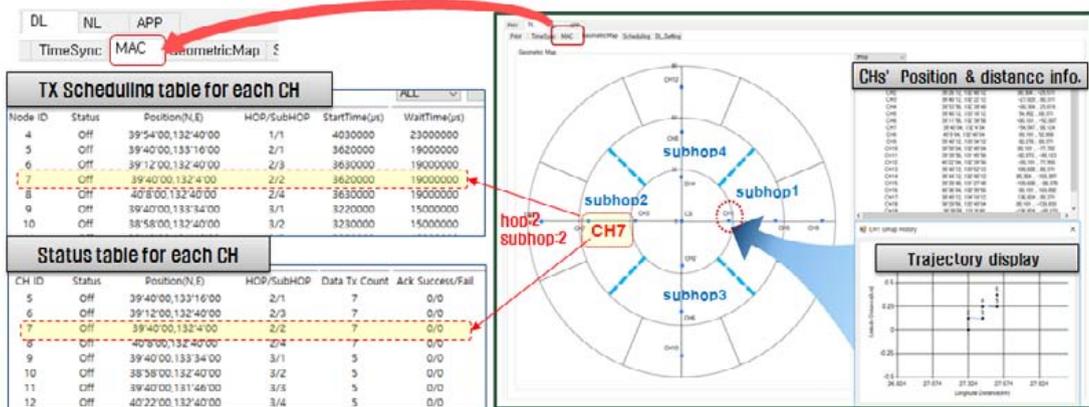


그림 11. MAC 프로토콜 기능 검증 결과
Fig. 11. Test result of function of the MAC protocol

그림 8에서 CH7노드의 경우 CS노드와 2홉 위치이며, 노드위치도상 서브홉2에 속하고, 그에 따라 전

송스케줄을 결정하여 전송을 위한 시작시간과 대기시간을 설정한다.

3.3.2 동기화 프로토콜

동기화 프로토콜 기능검증 조건은 그림 10(b)와 같다. 1개의 CS 노드와 7개의 CH 노드(n1-n7)로 구성되며 최대 5홉 통신을 수행하며, 동일 홉을 가진 수중 노드가 홉 1과 홉2에서 각각 존재한다.

그림 12는 시간동기화 프로토콜 기능검증 결과에 대한 UANet GUI 화면의 일부를 노드별로 선택하여 캡처한 것이다. 그림 12(a)는 단일 홉 동기화를 수행하는 노드 n1의 동기화 결과로, CS 노드로부터 수신한 패킷의 수신시각과 CS노드의 송신시각 정보를 추출하여 저장하고 이를 누적하여 스큐와 오프셋을 계산한다. 그림 12(b)는 다중 홉 동기화를 수행하는 노드 n3의 동기화 결과로, 1홉 노드인 n2로부터 수신한 패킷정보를 토대로 동기화를 수행하고, 노드 n3와 동

일 홉에 위치한 노드 n4와 별도의 동기화를 수행하여 스큐와 오프셋에 대한 평균을 취한다.

3.3.3 라우팅 프로토콜

라우팅 프로토콜 기능검증 조건은 그림 10(c)와 같다. 1 개의 CS 노드와 6 개의 CH 노드(노드: 1-6)로 구성되며 최대 3홉으로 통신을 수행하고, 상향링크 라우팅 유효시간은 500 초이다.

그림 13은 라우팅 기능검증에 대한 결과로 노드 4의 라우팅 테이블과 CS 노드의 하향링크 테이블을 UANet GUI 화면으로 캡처한 것이다. CS에서 CH로 전달되는 메시지를 통해서 상향링크 라우팅 테이블이 갱신되며, 노드 4는 CS 노드로 가기 위한 경로로 노드 1과 노드 2중에 홉 간 최대 거리가 최소인 노드 2

No.	RxTime(μs)	Src Node ID	TxTime(μs)	Skew/Offset
1	261010000	0	259990000	0.9998997/27852
2	344040000	0	343030000	1.00018/22285
3	427080000	0	426070000	1.00024/21714
4	510070000	0	509110000	1.00009/13225
5	593070000	0	592150000	0.9999613/9031
6	676110000	0	675190000	0.9999341/10783
7	759170000	0	758230000	0.9999338/14119
8	842230000	0	841270000	0.9999445/16658

No.	RxTime(μs)	Src Node ID	TxTime(μs)	Hop Count	Skew/Offset
1	264490000	2	262530000	1	1.000261/-17331
2	271850000	4	271090000	2	1.000221/-31698
3	347440000	2	345370000	1	1.000289/-44443
4	354840000	4	354130000	2	1.000066/-39018
5	430440000	2	428610000	1	1.000084/-47304
6	437880000	4	437170000	2	0.9999278/-32359
7	513570000	2	511650000	1	0.9999959/-28269
8	520990000	4	520210000	2	0.9999105/-17961
9	596710000	2	594690000	1	1.000047/-15006
10	604080000	4	603250000	2	0.9999655/-12071
11	679740000	2	67730000	1	1.000082/-18749
12	687090000	4	686290000	2	0.9999871/-17205
13	762760000	2	760770000	1	1.000085/-22411
14	770140000	4	769230000	2	1.000004/-16757
15	845790000	2	843810000	1	1.000081/-24235
16	853210000	4	852370000	2	1.000028/-14646

(a) 노드 n1에 대한 단일 홉 동기화 테이블
(a) Single hop synchronization table for node n1

(b) 노드 n3에 대한 다중 홉 동기화 테이블
(b) Multi-hop synchronization table for node n3

그림 12. 동기화 프로토콜 기능 검증 결과
Fig. 12. Test result of function of the synchronization protocol

No.	Time	Next HOP Address	Sender Position	HOP Count	EI	VTime(s)	Priority	Detour	remain_VTime(ms)
1	2017-05-19 15:41:11	1	9'46"8, 2'58"8	2	0	600	1	1	590360
2	2017-05-19 15:41:11	2	9'34"0, 2'58"8	2	1	600	0	1	591490
3	2017-05-19 15:41:11	3	9'46"8, 3'12"8	3	1	600	2	1	584930

(a) 노드 4에 대한 상향링크 라우팅 테이블
(a) Uplink routing table for node 4

No.	Time	Dest Address	Dest Position	Next HOP Address	Hop Count	VTime(s)	Priority	remain_VTime(ms)
1	2017-05-19 15:41:25	3	9'46"8, 3'12"8	1	2	500		
2	2017-05-19 15:41:25	5	9'45"52, 3'25"52	1	3	500		
3	2017-05-19 15:41:25	4	9'33"52, 3'11"52	2	2	500		
4	2017-05-19 15:41:25	6	9'34"0, 3'26"0	2	3	500		477580
5	2017-05-19 15:41:25	1	39'46"0, 132'58"0	1	1	500		492320
6	2017-05-19 15:41:25	2	39'34"0, 132'58"0	2	1	500		493780

(b) CS노드에 대한 하향링크 라우팅 테이블
(b) Downlink routing table for CS

그림 13. 라우팅 프로토콜 기능 검증 결과
Fig. 13. Test result of function of the routing protocol

경로를 우선순위를 가장 높게 두어 라우팅 테이블을 생성한다. CH 노드들이 CS 노드에게 전송하는 메시지를 통해서 CH 노드들과 CS는 모든 노드들(1-6)의 하향링크 라우팅 테이블을 생성하고 갱신한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 장거리 수중네트워크를 위한 각 계층별 프로토콜의 핵심 기능 및 알고리즘을 소프트웨어로 구현하였다. 또한 계층간 프로토콜을 통합 운용하기 위한 인터페이스를 설계하고 이를 위한 운용 GUI를 구현하였다. 구현된 장거리 수중네트워크 프로그램은 물리계층 에뮬레이션을 통해, 각 계층별 프로토콜 기능이 네트워크 시나리오에 따라 잘 동작하는 것을 확인하였다.

향후 구현된 장거리 수중네트워크 프로그램에 대해 물리계층의 수중통신 시스템과 연동한 실내 시험과 실해역 시험 수행을 통해 각 계층별 프로토콜 기능을 검증할 예정이다.

References

[1] J. Heidemann, M. Stojanovic, and M. Zorzi, "Underwater sensor networks: applications, advances and challenges," *Phil. Trans. R. Soc. A*, vol. 370, no. 1958, pp. 158-175, 2012.

[2] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "Underwater acoustic sensor networks: research challenges," *Ad hoc networks*, vol. 3, no. 3, pp. 257-279, 2005.

[3] S. Climent, A. Sanchez, J. V. Capella, N. Meratnia, and J. J. Serrano, "Underwater acoustic wireless sensor networks: advances and future trends in physical, MAC and routing layers," *Sensors*, vol. 14, no. 1, pp. 795-833, 2014.

[4] J. Partan, J. Kurose, and B. N. Levine, "A survey of practical issues in underwater networks," *ACM SIGMOBILE Mob. Comput. and Commun. Rev.*, vol. 11, no. 4 pp. 23-33, 2007.

[5] S. H. Byun, S. M. Kim, and Y. K. Lim, "Long-range sound transmission characteristics in shallow-water channel with thermocline," *The J. Acoust. Soc. of Korea*, vol. 33. no. 5,

pp. 273-281, 2014.

[6] S. G. Kim, S. S. Sung, N. Yun, C. Yun, and Y. K. Lim, "An implementation of signal processing platform for long-range underwater acoustic modem," in *Proc. KICS Int. Conf. Commun.*, pp. 490-491, Jeju Island, Korea, June, 2015.

[7] C. Yun and Y. K. Lim, "GSR-TDMA: A geometric spatial reuse-time division multiple access MAC protocol for multihop underwater acoustic sensor networks," *J. Sensors*, vol. 2016, 2016.

[8] A. R. Cho, "Synchronizing to packet trains for underwater acoustic networks," in *Proc. KIICE Conf.*, Busan, Korea, June, 2017.

[9] Y. Choi and Y. K. Lim, "A study on a routing metric for underwater ad-hoc network," in *Proc. KICS Int. Conf. Commun.*, pp. 367-368, Jeju Island, Korea, June, 2015.

조 아 라 (A-ra Cho)



2002년 2월 : 경희대학교 전자공학과 학사

2012년 2월 : 과학기술연합대학원대학교(UST) 해양정보통신공학과 박사

2012년~현재 : 한국해양과학기술원 선박플랫폼 연구소 (KRISO) 선임기술원

<관심분야> 수중음향 네트워크, 해상통신 네트워크

윤창호 (Changho Yun)



1999년 2월 : 창원대학교 메카트로닉스학과 학사
2004년 2월 : 광주과학기술원 (GIST) 정보통신공학과석사
2007년 8월 : 광주과학기술원 (GIST) 정보통신공학과박사
2007년 11월~2008년 12월 :

North Carolina State Univ. 전산학과 박사후과정
2008년 12월~현재 : 한국해양과학기술원 선박플랜트 연구소(KRISO) 책임연구원
2009년~현재 : 과학기술연합대학원대학교 해양정보통신공학과 겸임교수
<관심분야> 해양 선박 네트워크, 수중네트워크

임용곤 (Yong-kon Lim)



1979년 : 충남대학교 전기공학 학사
1984년 : 충남대학교 전기공학 석사
1994년 : 아주대학교 전자공학 박사
1980년~현재 : 한국해양과학기술원 선박플랜트 연구소(KRISO) 책임연구원

2004년~현재 : 과학기술연합대학원대학교 해양정보통신공학과 정교수/겸임교수
<관심분야> 수중음향 통신 시스템 및 네트워크, 네트워크 프로토콜

김승근 (Seung-Geun Kim)



1995년 2월 : 인하대학교 전자공학과 학사
1997년 2월 : 광주과학기술원 정보통신공학과 석사
2002년 8월 : 광주과학기술원 정보통신공학과 박사
2002년 10월~현재 : 한국해양과

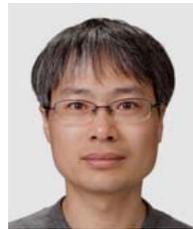
학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 책임연구원
2004년 3월~2015년 2월 : 과학기술연합대학원대학교 해양정보통신공학과 겸임교원(부교수)
2015년 3월~현재 : 과학기술연합대학원대학교 해양시스템공학과 겸임교원(교수)
<관심분야> 수중음향통신 시스템 개발, 해상 VHF 디지털 통신 시스템 개발, 선박 항해통신 장치 및 서비스

서수진 (Sujin Seo)



2006년 2월 : 한밭대학교 컴퓨터공학과 학사
2009년~현재 : 선박해양플랜트 연구소 연구원 재직중
<관심분야> 해양 선박 네트워크, 수중네트워크

최영철 (Youngchol Choi)



1998년 2월 : KAIST 전기및전자공학과(공학사)
2000년 2월 : KAIST 전기및전자공학과(공학석사)
2011년 8월 : KAIST 전기및전자공학과(공학박사)
2000년 3월~현재 : 선박해양플랜트연구소 책임연구원

<관심분야> 해양정보통신 네트워크, 수중 통신 네트워크 및 신호처리