논문 2014-51-4-10

수중 모바일 애드 혹 네트워크를 위한 MAC 프로토콜 설계 및 구현

(Design and Implementation of MAC Protocol for Underwater Mobile
Ad-hoc Networks)

이 진 영*, 윤 남 열*, 박 수 현**

(Jin-Young Lee, Nam-Yeol Yun, and Soo-Hyun Park[©])

요 약

본 논문에서는 수중 매체의 특성 중의 하나인 긴 전송 지연을 고려한 수중 모바일 애드 혹 네트워크 기반의 MAC 프로토콜을 제안한다. 특히, 이에 효율적인 3-way handshaking 방식(RTS/CTS/DATA)을 채택하였으며 기존 방식의 문제점인 RTS 메시지와 CTS 메시지 간의 충돌을 회피할 수 있는 방법을 제시함으로써 데이터 전송의 비효율성을 극복할 수 있다. 또한, 본 논문에서 제안하는 MAC 프로토콜은 현재 구현이 가능한 기술을 통하여 수중 모바일 애드 혹 네트워크에서 실질적으로 적용이 가능한 MAC 프로토콜로서, 수중 환경의 여러 특성들을 고려하여 설정한 가변적인 RWT(Request-To-Send Waiting Time)을 통하여 이동 노드의 움직임에 따른 다양한 네트워크의 크기를 반영한다. 마지막으로 실험을 통해 데이터 처리량, 패킷 수신 실패율, 평균 전송 시간, 에너지 소비량, 채널 이용률 측면에서 기존의 MAC 프로토콜과 성능을 비교 및 분석함으로써 그 효율성을 검증한다.

Abstract

In this paper, we propose a MAC(Media Access Control) protocol based on flexible RWT(RTS Waiting Time) for underwater mobile ad-hoc networks with a three-way handshaking mechanism. This protocol can solve a problem of collision between RTS(Request-To-Send) and CTS(Clear-To-Send) packets in existing MACA(Multiple Access with Collision Avoidance) protocol. This proposed MAC protocol is also an effective protocol which can apply to underwater mobile ad-hoc networks in a real field by using implementable technologies. We set flexible RTS Waiting Time called RWT, considering various characteristics of underwater environment. It is possible to support variable network size according to node mobility. Finally, we conduct a performance evaluation between proposed MAC protocol and existing MACA based MAC protocol through practical implementation and experiment. As a result, we verify the superiority of our proposed MAC protocol in terms of throughput, packet drop rate, average transmission time, energy consumption and channel utilization.

Keywords : Underwater Acoustic Networks, Underwater Mobile Ad-hoc Networks,
Media Access Control Protocol, Request-To-Send Waiting Time

* 학생회원, ** 평생회원, 국민대학교, 비즈니스IT전문대학원
(Graduate School of Business IT, Kookmin University)

© Corresponding Author(E-mail: shpark21@kookmin.ac.kr)

※ 이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임
(NRF-2013R1A1A2012461).

접수일자: 2014년1월14일, 수정일자: 2014년2월5일

수정완료: 2014년4월1일

I. 서 론

수중 음파 통신은 미래의 무한한 해양 자원을 개발하기 위한 필수적인 기술로서 주목을 받고 있다. 이 기술을 통하여 수중에 존재하는 다양한 생물체와 환경 정보에 대한 실시간 감시뿐만 아니라 수집한 데이터에 대한 정확한 분석을 바탕으로 예측 활동이 가능하다. 또한 석유 및 가스 하이드레이트 등의 대체 에너지와 식량 자원 등과 같은 다양한 해양 자원 탐사, 지진 조기 탐사를 통한 재난 방지, 수중 환경오염 방지, 해양 생물서식 분포와 해양 생태계 분석 및 예측, 해저 침입 감지와 저지를 통한 군사적 방어 등 다양한 분야에 응용될 수 있다.

지상에서 사용되는 RF(Radio Frequency) 통신은 수중에서 심각한 감쇠현상을 일으키기 때문에 수중 통신에 적합하지 않다. 수중에서는 음파에 의한 제한적인 통신만이 가능하지만 이러한 수중 음파 통신 역시 매체의 특성으로 인하여 많은 제약 사항이 존재한다. 예를 들어, 긴 전송 지연(Long Propagation Delay), 높은 비트 에러율(High Bit-Error Rate), 제한된 대역폭(Low Bandwidth), 외부환경에 의한 다중 잡음 등으로 인하여 데이터 손실이 심각하게 발생한다. 따라서 수중에서의 MAC 프로토콜은 위와 같은 수중 환경의 특징과 한계점을 고려하여 설계되어야 한다.

특히, 최근에는 AUV(Autonomous Underwater Vehicle), ROV(Remotely Operated Vehicle), UUV(Unmanned Underwater Vehicle)와 같은 수중 이동체부터 생체모방형 로봇 물고기에 이르기까지 다양한 종류의 수중 이동 노드들이 개발됨에 따라 위와 같은 분야들이 더욱 활성화되고 있는 가운데, 이러한 수중 이동 노드들 간에 원활한 통신을 위하여 수중 모바일 애드 혹 네트워크(Underwater Mobile Ad-hoc Network)에서의 MAC(Media Access Control) 프로토콜에 대한 연구가 필수적으로 요구되고 있다.

본 논문에서는 수중 매체의 특성 중의 하나인 긴 전송 지연을 고려한 수중 모바일 애드 혹 네트워크 기반의 MAC 프로토콜을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 기존의 무선 통신 네트워크와 이를 기반으로 하는 MAC 프로토콜들을 통해 수중 모바일 애드 혹 네트워크의 특징과 이에 적용이 가능한 수중 MAC 프로토콜들을 살펴본

다. III장에서는 제안한 MAC 프로토콜에 대해서 자세히 설명하며, 다음으로 IV장에서는 제안한 MAC 프로토콜을 실제로 구현함으로써 수중 모바일 애드 혹 네트워크를 위한 MAC 프로토콜로서의 효율성을 검증할 것이다. 마지막으로 V장에서는 결론 및 향후 연구 방향을 제시한다.

II. 관련 연구

1. 수중 음파 네트워크

수중 음파 네트워크(Underwater Acoustic Networks)는 네트워크의 토폴로지에 따라서 인프라스트럭처 네트워크(Infrastructure Network)와 모바일 애드 혹 네트워크(Mobile Ad-hoc Network)로 나뉜다^[1].

인프라스트럭처 네트워크는 고정 게이트웨이 또는 AP(Access Point)를 가지며, 노드들 간의 연결 설정이 계층적이고 수직적이다. 반면, 애드 혹 네트워크에는 클러스터 헤드와 같은 특정한 중앙 집중적인 노드가 존재하지 않으며, 동일한 네트워크를 구성하는 각 노드들의 자유로운 데이터 송·수신을 보장한다. 특히, 이동이 가능한 노드로 구성된 자율적이고 수평적인 망인 모바일 애드 혹 네트워크는 다음과 같은 특징을 가진다^[2].

그림 1. 인프라스트럭처 네트워크와 모바일 애드 혹 네트워크

Fig. 1. Infrastructure Network and Mobile Ad-hoc Network.

(1) 다양한 토폴로지

노드들은 각자 다른 속도로 자유롭게 움직이기 때문에, 네트워크 토폴로지가 무작위로 바뀔 수 있으며 이를 예측하기 힘들다.

(2) 에너지 제한적인 동작

모바일 애드 혹 네트워크의 대부분의 노드는 배터리에 의존적이며, 한정적인 에너지 용량을 갖고 있다. 따라서 이러한 이동 노드의 에너지에 대한 관리가 필요하다.

(3) 제한된 주파수대역

무선 링크는 인프라스트럭처 네트워크보다 상당히 낮은 주파수 대역을 갖고 있다. 또한 다중 접근, 감쇠, 잡음, 간섭 등으로 인하여 실제 무선 통신의 처리량은 최대 전송률보다 낮다.

(4) 보안 위협

일반적으로 모바일 무선 네트워크는 고정된 케이블 네트워크보다 물리적으로 보안 위협을 당하기 쉽다. 보안을 위협하는 다양한 공격에 대해 주의 깊게 살펴야 한다.

최근 많은 종류의 수중 이동 노드들이 개발됨으로써, 이를 적용한 수중 모바일 애드 혹 네트워크(Underwater Mobile Ad-hoc Network)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 지상에서 사용되는 무선 통신 네트워크의 MAC 프로토콜을 수중 환경에 그대로 적용하기에는 많은 어려움이 따른다. 따라서 수중 모바일 애드 혹 네트워크 기반의 효율적인 MAC 프로토콜을 개발하기 위해서는 수중 환경의 제약 사항과 특징을 필수적으로 고려해야 한다.

2. 무선 통신 네트워크 기반의 MAC 프로토콜

다양한 토폴로지의 통신 네트워크에서 여러 노드들이 하나의 링크를 공유할 때, 이에 접근하는 것을 조율하기 위해서는 매체 접근 제어(Media Access Control) 또는 다중 접근 제어(Multiple Access Control) 프로토콜이 필요하다. 이러한 MAC 프로토콜은 크게 비경쟁 기반과 경쟁 기반 프로토콜로 나눌 수 있다.

우선, 비경쟁 기반의 MAC 프로토콜은 채널화(Channelization) 방식^[7]을 포함한다. 채널화란 매체의 가용 대역폭을 노드들 사이에서 일정한 기준에 따라 분할하여 다중 접근하는 것으로서, 대표적으로 코드 분할 다중 접근(CDMA, Code Division Multiple Access), 주파수 분할 다중 접근(FDMA, Frequency Division Multiple Access), 시간 분할 다중 접근(TDMA, Time

Division Multiple Access) 방식이 있다. CDMA는 동시에 다수의 노드의 전송이 가능하지만 수중에 적용하기에는 기술적 어려움이 따른다. 또한 지상 환경에서의 FDMA는 각 노드에게 다른 주파수 대역을 할당함으로써 동시시간대의 데이터 충돌을 방지할 수 있지만 주파수대역이 매우 한정적인 수중 환경에는 적합하지 않다. 그리고 충돌을 방지하기 위하여 각 노드에게 데이터 전송 시간을 할당하는 방식인 TDMA는 노드의 수가 증가할수록 전송 대기 시간이 길어진다는 단점이 있으며, 수중 환경에서는 시간 동기화가 어려우므로 적합하지 않을 뿐만 아니라 또한 이를 적용한 MAC 프로토콜은 노드의 이동성을 보장할 수 없으므로 수중 모바일 애드 혹 네트워크를 위한 MAC 프로토콜에 적용하기 어렵다.

다음으로 경쟁 기반 MAC 프로토콜에는 ALOHA^[8], CSMA/CA (Carrier Sensing Multiple Access with Collision Avoidance)^[9], MACA(Multiple Access Collision Avoidance)^[10], MACAW(Multiple Access Collision Avoidance-Wireless)^[11], FAMA(Floor Acquisition Multiple Access)^[12] 등이 있으며, 이를 기반으로 하는 다양한 수중 MAC 프로토콜이 존재한다.

Slotted FAMA^[13]는 긴 RTS/CTS의 길이 때문에 수중 환경에 적합하지 않다는 기존의 FAMA의 문제점을 해결하기 위해서 고안되었다. 미리 설정된 슬롯이 시작될 때마다 각 패킷을 보내는 방법으로, 이를 통하여 상호 간의 패킷 충돌을 줄이고자 하였다.

또한 MACA-MN(MACA with packet train for Multiple Neighbors)^[14]은 멀티 홉 수중 네트워크에서 하나의 수신 노드와 다수의 이웃 노드를 목적노드로 하는 경우를 위하여, 기존 MACA 프로토콜의 RTS/CTS handshaking 방식과 Packet Train 방식을 기반으로 제안된 MAC 프로토콜이다. 기존의 방식은 RTS 패킷을 수신한 목적 노드가 바로 CTS 패킷을 전송하는 것에 비해, MACA-MN에서의 목적 노드는 이웃 노드 간의 전송 지연을 고려하여 일정한 시간을 대기한 후 CTS 패킷을 전송함으로써, RTS/CTS 패킷 간 충돌을 회피할 수 있도록 하였다.

Ng, Hai-Hung^[15]은 기존의 MACA 프로토콜에서의 상태 변화 규칙, 패킷 전달 방법, 백오프 알고리즘 등 세 가지 측면을 수중 환경에 적합하도록 변형한 MACA-U(MACA for Underwater)를 제안하였다.

위와 같이 ALOHA를 제외한 대부분의 경쟁 기반

MAC 프로토콜에서는 실제 데이터를 전송하기 전에 데이터의 길이보다 짧은 길이의 RTS(Request-To-Send) 또는 CTS(Clear-To-Send)와 같은 제어 메시지를 주고받음으로써 데이터의 충돌을 방지하는 방법을 사용한다.

수중 모바일 애드 혹 네트워크의 이동 노드들은 자율적인 데이터 송·수신이 보장되어야 한다. 주기적으로 데이터를 전송하는 고정 노드와는 달리, 자유롭게 이동하면서 비주기적으로 데이터를 전송할 수 있다는 것이 이동 노드의 장점이므로 이를 효과적으로 지원할 수 있는 MAC 프로토콜이 필요하다. 또한 수중 환경에서는 데이터를 전송하는 데 드는 비용이 높기 때문에 데이터 충돌을 최대한으로 회피할 수 있는 방식이 요구된다. 그러므로 데이터 충돌 확률이 높은 ALOHA 방식보다는 최소한의 제어 메시지를 교환하는 RTS/CTS/DATA 방식의 3-way 핸드셰이킹 기반 MAC 프로토콜이 수중 모바일 애드 혹 네트워크에 적합하다.

III. 본 론

본 논문에서 제안한 MAC 프로토콜은 수중 매체의 특성 중의 하나인 긴 전송 지연으로 인하여 발생하는 데이터 전송의 비효율성을 극복하기 위함이다. 수중 노드들은 데이터를 전송하기에 앞서 채널 예약을 위해 RTS 메시지와 CTS 메시지를 교환한다. 이 때, 두 메시지 간의 충돌이 발생한다면 각 노드는 데이터 전송 기회를 획득하지 못한 채 지속적으로 RTS 및 CTS 메시지 교환을 시도한다. 이 경우 통신의 주요 목적인 데이터 송·수신은 시도조차 하지 못한 채, 오히려 네트워크의 과부하만 발생하게 된다.

그림 2는 기존 MACA 기반 MAC 프로토콜의 문제점을 나타낸다. 둘 이상의 노드에서 같은 목적 노드에 RTS 메시지를 전송하더라도 각 노드 간의 거리와 전송 지연으로 어느 하나는 늦게 도착하게 된다. 기존의 MAC 프로토콜에서는 목적 노드가 먼저 수신한 RTS 메시지의 노드에게 CTS 메시지를 회신할 때 전송 지연으로 인하여 늦게 도착하는 RTS 메시지와 충돌이 발생하는 문제점이 있다.

또한 RTS 메시지를 수신할 때마다 각각에 대한 CTS 메시지를 회신하기 때문에 CTS 메시지 전송에 따른 에너지 소모가 증가하며, 이는 데이터 전송 트래

그림 2. 기존 MACA 기반 MAC 프로토콜의 문제점

Fig. 2. A Problem of existing MAC protocol based MACA.

픽에 비례하므로 노드의 수나 데이터 전송 횟수가 증가할수록 더 많은 에너지를 소모하게 된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제를 해결할 수 있는 수중 모바일 애드 혹 네트워크 기반의 MAC 프로토콜을 제안한다.

1. 수중 모바일 애드 혹 네트워크

다음의 그림 3은 수중 모바일 애드 혹 네트워크 아키텍처

그림 3. 수중 모바일 애드 혹 네트워크 아키텍처

Fig. 3. An Architecture of Underwater Mobile Ad-hoc Network.

텍처를 나타낸다. 이는 대표적으로 수중 환경 감시 시스템에 적용이 가능하다.

수중 모바일 애드 혹 네트워크에서의 수중 노드는 자유롭게 이동하면서 환경 정보를 수집하여 그것을 수면의 게이트웨이에게 전송한다. 또한 필요에 따라 군집 제어와 같은 상호 간의 메시지를 교환하기도 한다. 여러 개의 노드들로 구성된 군집에서 대표로 선정된 클러스터 헤드가 자신에게 종속된 노드들을 제어하는 기존의 방식에서는 클러스터 헤드에게 주요 기능이 집중되어 있다. 이와 달리, 수중 모바일 애드 혹 네트워크에서의 각 노드는 데이터 수집 기능, 데이터 처리 기능, 데이터 송·수신 기능 등 모든 기능을 갖춰야 한다.

이러한 수중 모바일 애드 혹 네트워크 기반의 수중 환경 감시 시스템을 효율적으로 운영하기 위한 MAC 프로토콜을 개발하기 위해서 다음과 같은 사항을 고려해야 한다.

(1) 데이터 신뢰성

수중 모바일 애드 혹 네트워크에서 가장 우선적으로 고려해야 할 요소는 데이터 신뢰성이다. 긴 전송 지연과 RTS/CTS handshaking 방식 탓에 데이터가 제 시간 내에 도착하지 않는다면 그 데이터는 불필요한 데이터가 되어버릴 수 있기 때문이다.

예를 들어, 수중 모바일 애드 혹 네트워크의 대표적인 응용 분야 중 하나인 수중 환경 감시 시스템에서 노드들에 의하여 수집 및 송·수신되는 메시지들은 그 중요도와 긴급한 정도가 서로 다르다. 즉, 노드의 운용 메시지는 환경 정보 값보다 우선되어야 할 것이다. 본 논문에서 제안하는 MAC 프로토콜은 데이터의 전송 우선순위 정책에 따라 긴급한 메시지를 먼저 전송할 수 있도록 함으로써 데이터의 신뢰성을 높일 수 있다.

(2) 에너지 효율성

수중 모바일 애드 혹 네트워크에서의 수중 노드는 배터리의 용량이 한정되어 있으며 배터리 교체 또한 쉽지 않으므로 에너지 소모량을 최대한 줄여야 한다. 기존의 MACA 기반의 프로토콜은 하나의 데이터 패킷을 보낼 때마다 RTS, CTS 또는 ACK와 같은 여러 개의 제어 패킷들이 필요하므로 에너지 소모가 클 수밖에 없다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여, 본 논문에서는 여러 개의 RTS를 받은 노드가 한 번의 CTS를 전송함으로

써 에너지 효율성을 높일 수 있는 방안을 제시한다.

(3) 노드의 이동에 따른 네트워크의 확장성

노드가 이동함으로써 변화되는 노드 간의 거리로 인하여 전송 지연 시간이 달라질 뿐만 아니라, 노드의 진입과 탈퇴로 인해 네트워크의 크기가 빈번하게 바뀔 수 있다. 가변적인 RTS 대기 시간(RWT, RTS Waiting Time)을 통하여 이러한 네트워크의 확장성을 보장할 수 있다. RWT는 RTS 패킷을 수신한 목적노드가 자신을 목적지로 하는 또 다른 RTS 패킷을 기다리기 위한 시간이다. RWT를 설정한 이유는 긴 전송 지연이라는 특성을 가진 수중 모바일 애드 혹 네트워크에서, RTS/CTS 패킷 충돌을 방지함으로써 상대적으로 거리가 먼 노드에게 전송 기회를 주기 위함이다.

2. 데이터 전송 우선순위 부여 정책

수중 환경 감시 시스템에서는 노드들 간의 신뢰성 있는 데이터 전송이 중요하다. 이를 보장하기 위하여, 노드들 간에 송·수신된 메시지의 긴급한 정도를 파악하여 이에 따라 데이터 전송 우선권을 부여한다.

기존의 프로토콜에서의 목적 노드는 RTS 메시지를 수신하자마자 전송 가능 여부에 따라 CTS 메시지를 곧바로 회신한다. 이와 달리, 제안한 MAC 프로토콜에서의 목적 노드는 RTS 메시지를 수신하면 미리 설정된 RWT 동안에 자신을 목적지로 하는 다른 RTS 메시지의 수신을 대기한다. 만약 목적 노드가 다수의 RTS 메시지를 수신하였다면, RTS 메시지의 유형에 따라 데이터 전송 우선순위를 결정한다.

그림 4는 MAC 프레임 구조를 나타낸다. (A)는 RTS 프레임의 MAC Header 부분을 나타내며, 이는 데이터 타입, 수신 노드의 주소, 송신 노드의 주소, 데이터 속성

그림 4. MAC 프레임 구조

Fig. 4. MAC Frame Structure.

으로 구성되어 있다. 즉, 송신 노드는 자신이 보내고자 하는 메시지의 유형을 데이터 속성 부분에 저장하여 목적 노드에게 전송한다.

메시지의 종류는 이를 적용하려는 응용 도메인에 따라서 달라진다. 예를 들어, 수중 환경 감시 시스템의 경우 송·수신되는 메시지의 종류는 다음과 같다.

우선 수중 환경 감시 시스템의 메시지들은 노드 운영 메시지와 환경 정보 값으로 나눌 수 있다. 노드 운영 메시지는 이동 노드들의 운용을 위한 긴급 회귀 메시지, 이동 속도 및 방향 등을 제어할 수 있는 제어 메시지, 노드 간의 메시지 교환을 위한 상호 메시지 등이 있다. 이와 더불어, 용존 산소량, 탁도, 수소이온농도, 수온 등 환경 정보 값을 통하여 수중 환경 감시를 할 수 있다.

노드 운용 메시지는 항상 환경 정보 값보다 우선하며, 환경 정보 값 간의 우선순위는 수중 환경에 미치는 영향이 가장 큰 것을 높은 우선순위로 설정함으로써 수중 환경 감시 시스템 안에서 긴급한 메시지를 먼저 처리할 수 있도록 하여 데이터의 신뢰성을 보장하도록 한다. 표 1은 이에 따른 메시지 우선순위의 예를 나타낸 것이다.

이후, 다수의 RTS 메시지를 수신한 목적 노드는 RTS 메시지의 데이터 속성 부분을 서로 비교하여 표 1에 따라서 긴급한 정도를 파악한 후, 데이터 전송 우선순위를 결정한다. 그리고 그림 4의 (B)와 같이 이러한

표 1. 수중 환경 감시 시스템에서의 메시지들 간 우선순위

Table 1. A priority between messages in underwater environmental monitoring system.

분류	우선순위	메시지유형
노드 운용 메시지	1	긴급 회귀 메시지
	2	방향 제어 메시지
	3	노드 간의 상호 메시지
	(...)	(...)
환경 정보 값	4	용존산소량
	5	탁도
	6	수소이온농도
	7	수온
	(...)	(...)

정보를 담은 CTS 메시지를 모든 노드들에게 전송한다.

3. 제안한 MAC 프로토콜의 동작 과정

제안한 MAC 프로토콜의 세부 동작 과정은 다음과 같다.

Step 1. 송신 노드는 실제 데이터를 전송하기 전에, 목적노드에게 채널 예약을 위한 RTS 메시지를 전송한다.

Step 2. RTS 메시지를 받은 목적 노드는 RTS Waiting Time을 설정한 후, 자신을 목적으로 하는 다른 노드의 RTS 메시지를 기다린다. 이 때, RWT의 길이는 노드의 이동 속도와 최대 통신 범위에 따라 가변적이다.

Step 3. RWT 시간이 만료되면 목적 노드는 다수의 RTS 메시지에 대하여 전송 우선순위를 매긴 후, 이 정보를 CTS 메시지에 담아 각 노드들에게 회신한다. 전송 우선순위는 전송 할 메시지의 긴급한 정도에 따라 결정된다.

Step 4. 송신 노드들은 CTS 메시지를 통해 자신의 전송 순서를 파악할 수 있다. 각 노드들은 이를 대기하며 자신의 전송 순서에 맞추어 데이터를 전송한다.

그림 5는 제안한 MAC 프로토콜의 상태 천이도를 나타낸다. 각 노드는 다음과 같은 상태로 동작을 한다.

그림 5. 제안한 MAC 프로토콜의 상태 천이도

Fig. 5. A State transition diagram of proposed MAC protocol.

- **IDLE** 다음 동작을 위한 대기 상태이다. 노드는 *IDLE*에서 RTS 메시지를 수신하거나 전송할 수 있다.
- **QUITE** 다른 노드를 목적지로 하는 xRTS 또는 xCTS 메시지를 수신하였을 경우 이들의 메시지 교환이 끝날 때까지 *QUITE*로 진입하여 대기한 후, 다시 *IDLE*로 돌아간다. 만약 이 때 또 다른 xRTS 또는 xCTS 메시지를 수신하였다면 *QUITE* 시간을 재설정한다.
- **RWT** *IDLE*에서 RTS 메시지를 수신한 노드는 자신을 목적지로 하는 다른 RTS 메시지를 수신하기 위해서 일정 시간 동안 대기하는 *RWT*로 진입한다.
- **DATA_WAIT** *RWT* 시간이 경과되고 CTS 메시지를 송신한 수신 노드가 데이터를 기다리는 상태이다. 데이터 수신이 완료되거나 *DATA_WAIT* 시간이 만료되면 *IDLE*로 돌아간다.
- **CTS_WAIT** *IDLE*에서 전송할 데이터가 존재할 때, 먼저 채널 예약을 위한 RTS 메시지를 전송한 후, 이에 대한 CTS 메시지를 기다리는 상태이다.
- **TX-TURN_WAIT** CTS 메시지를 수신한 노드는 CTS 메시지 정보에 담긴 자신의 전송순서를 파악하여, 자신이 데이터를 전송할 때까지 대기한다. 데이터 송신이 완료되면 *IDLE*로 돌아간다.

그림 6은 제안한 MAC 프로토콜의 동작 예이다. 노드 A와 B, C는 모두 같은 통신 범위 내에 존재하며, 노

그림 6. 제안한 MAC 프로토콜의 동작 예

Fig. 6. An example of proposed MAC protocol.

드 A와 C의 거리는 노드 A와 B의 거리보다 멀다고 가정한다. 또한 각각의 노드는 일정한 속도로 움직인다.

노드 B의 RTS 메시지를 수신한 노드 A는 미리 설정된 RWT 동안 대기하면서 노드 C의 RTS 메시지를 수신하게 된다. 이 때, RWT는 노드의 이동 속도와 최대 통신 범위, 즉 네트워크의 크기에 따라 가변적이다.

노드 A는 데이터 전송 우선순위 부여 정책에 따라 노드 B와 C의 RTS 메시지에 저장된 데이터의 속성 값을 비교하여 서로 간에 데이터 전송 우선순위를 결정한 후, 그 정보를 CTS 메시지에 담아 모든 노드에게 전송한다. 이를 수신한 노드 B와 C는 CTS 메시지에 저장된 정보에 따라 데이터를 전송한다. 만약 노드 C의 데이터가 노드 B의 데이터보다 긴급한 정도가 높다고 가정한다면, 노드 A는 B의 RTS 메시지를 먼저 수신하더라도 노드 C에게 높은 전송 우선순위를 부여한다.

한편, 데이터 전송 우선순위가 낮은 노드 B는 자신의 데이터 전송 시간까지 대기해야 한다. 노드 B는 노드 C의 CTS 패킷의 전송 지연, 데이터 패킷에 대한 전송 시간과 전송 지연뿐만 아니라 노드 B가 B'로, 노드 C가 C'로 이동한 거리에 대한 전송 지연까지 고려하여 자신의 차례를 기다린 후, 목적 노드 A에게 자신의 데이터를 보낸다.

IV. 구현 및 성능 평가

본 논문에서는 수중 매체의 특성 중의 하나인 긴 전송 지연을 고려한 수중 모바일 애드 혹 네트워크 기반의 MAC 프로토콜을 제안하였다. 이를 실질적으로 구현함으로써 그 효율성을 검증한다.

1. 실험 환경

본 실험은 그림 7과 같이 1.8m × 1.8m의 수조에서 진행하였다. 노드 A와 B는 약 1,500 m 정도, 노드 A와 C는 약 3,000m 정도 거리가 떨어져 있으며, 네트워크의 최대 크기는 약 3,000m 정도라고 가정하였다. 각 노드의 거리에 대하여 전송 지연 시간을 통해 구현함에 따라 전체 네트워크의 크기를 반영할 수 있다.

실험에 사용된 노드는 수신 노드 1개, 송신 노드 2개로 총 3개의 노드이며, 수신 노드가 두 개의 송신 노드에서 모두 데이터를 수신할 때 까지를 한 번의 주기로 설정하였다.

그림 7. 테스트 베드

Fig. 7. Test-bed.

표 2. 실험 환경 변수

Table 2. Parameter of Experimental Environment.

Parameter	Value
채널	Single
네트워크 크기	최대 3,000m
음파 속도	1,500m/s
데이터 전송률	50bps / 200bps
제어 패킷 크기	7bytes
데이터 패킷 크기	26bytes

2. 수중 센서 노드

본 실험은 데이터 수집 기능, 데이터 처리 기능, 데이터 송·수신 기능 등을 수행하는 수중 센서 노드를 통하여 진행된다.

(1) 데이터 수집 기능

수중 센서 노드는 센서를 통하여 온도, 수소이온농도, 탁도, 용존산소량 등과 같은 환경 정보 값을 수집할 수 있다.

(2) 데이터 처리 기능

데이터 처리 기능은 MAC 베이스 보드가 담당하며, 상위 계층과 하위 계층의 데이터 흐름을 제어하는 역할을 한다. MAC 베이스 보드의 사양은 아래 표 3과 같다.

그림 8. MAC 베이스 보드

Fig. 8. MAC base-board.

표 3. MAC 베이스 보드의 상세 사양

Table 3. Specification of MAC base-board.

Feature	Description
MCU	Cortex-M3 (STM32F103CB)
OS	RWT 기반의 펌웨어
크기	가로 30mm, 세로 30mm
Power	3.3V, 5V

(3) 데이터 송·수신 기능

데이터를 송·수신하기 위한 물리적 계층을 담당하며,

그림 9. 수중 모뎀
Fig. 9. Underwater modem.

그림 10. 트랜스듀서
Fig. 10. Transducer

표 4. 수중 모뎀의 상세 사양

Table 4. Specification of underwater modem.

Feature	Description
MCU	Cortex-M3
Operating frequency	70 kHz
Max. data rate	200 bps
Max. operating range	50 m
Dimensions	직경 70mm, 높이 40mm

표 5. 트랜스듀서의 상세 사양
Table 5. Specification of transducer.

Feature	Description
Resonant Frequency	70 kHz (Nominal)
Beam Pattern	Omni directional
Input Power	190 Watts around resonance
Operating Depth	1500 Meters
Cable Type	Polyurethane Ø6mm Low Noise Coaxial

수중 모뎀과 트랜스듀서로 구성된다. 수중 모뎀의 주요 기능은 MAC 베이스 보드로부터 받은 PSDU를 PPDU로 변환한 후 아날로그 신호를 생성하거나, 아날로그 신호로부터 PPDU를 검출하여 PSDU를 MAC based board로 전달하는 것이다.

그림 9의 트랜스듀서는 수중의 음파 신호를 전기적 신호로 변환하여 주는 장치이다.

3. MAC 프레임 구조

MAC 프레임 구조는 앞 장에서 설명한 그림 4와 같다. 즉, MAC Header는 총 5 bytes로 데이터 타입, 수

표 6. MAC 프레임 유형과 값
Table 6. MAC Frame Types and Values.

Type	Value
Data Type	RTS 0x30
	CTS 0x31
	DATA 0x32
Destination & Source Address	Node A 0x91
	Node B 0x92
	Node C 0x93
Data Attribute	긴급 회귀 메시지 0XF3, 0xFF
	방향 제어 메시지 0XF2, 0xFF
	노드 간의 상호 메시지 0XF1, 0xFF
	용존산소량 0XD1, 0xFF
	탁도 0XC1, 0xFF
	수소이온농도 0XB1, 0xFF
	수온 0XA1, 0xFF
Tx_Priority	Node A 0x91
	Node B 0x92
	Node C 0x93

신 노드의 주소, 송신 노드의 주소가 공통적으로 포함되어 있으며 RTS 패킷에는 데이터 속성, CTS 패킷에는 데이터 전송 우선순위 값을 노드의 주소 또는 아이디로 저장할 수 있는 부분으로 구성되어 있다. 그리고 송·수신하고자 하는 실제 데이터의 크기는 응용 도메인에 따라 가변적이다. 마지막으로 MAC Footer는 총 1 byte로 CRC를 위한 부분이다. 본 구현에서는 데이터의 크기를 20 bytes로 설정하여, 총 26 bytes의 MAC 프레임 설정하였다.

표 6은 MAC 프레임 구조에 따른 MAC 프레임 유형과 그에 따른 값을 나타낸 것이다.

4. 제안한 MAC 프로토콜 구현

제안한 MAC 프로토콜은 MAC 베이스 보드를 통해 구현하였으며, 이는 그림 11과 같이 인터럽트 구동 방식에 의해 작동된다. 상위 계층과는 UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) 인터페이스를 통해, 하위 계층과는 SPI (Serial Peripheral Interface) 인터페이스를 통해 통신을 한다^[16]. 각 노드는 UART와 SPI 인터럽트 중 어떤 것이 구동되는지 지속적으로 확인을 하면서 패킷 수신을 대기한다. 만약 UART 인터럽트가 구동이 되었다면, 상위 계층으로부터 전달받은 데이터 패킷에 MAC Header와 Footer를 추가하여 하위 계층으로 전달한다. 아니면 SPI 인터럽트를 통해 하위 계층으로부터 실제 데이터 패킷을 수신할 수 있는데, 이렇게 전달받은 데이터 패킷은 오류 검증을 거친 후 상위 계층으로 전달된다. 이 때, 제안한 MAC 프로토콜이 구현된 MAC 베이스 보드와 물리 계층을 담당하는 수중 모뎀 사이의 SPI 통신을 위해서 미리 정의된

그림 11. 인터럽트 구동 방식
Fig. 11. Interrupt driven mechanism.

```

1  IF NodeMode == RxMode THEN
2  // by using SPI Interrupt-Driven Communication
3
4  PacketTypeToReceive NEW tmpPacket, RRTSPacket, RDataPacket, RTSBuffer[]
5  PacketTypeToSend    NEW SCTSPacket
6
7  tmpPacket <- ReceivePacket(Packet, From_LowerLayer)
8
9  CASE tmpPacket OF
10   RTS :
11     RRTSPacket <- tmpPacket
12     Buffering(RTSBuffer, RRTSPacket)
13
14     WHILE RTSWatingTime DO
15       WaitPacket(OtherRTSPacket)
16       tmpPacket <- ReceivePacket(Packet, From_LowerLayer)
17       IF tmpPacket == OtherRTSPacket THEN
18         OtherRTSPacket <- tmpPacket
19         Buffering(RTSBuffer, OtherRTSPacket)
20       ENDIF
21     ENDWHILE
22
23     SetTxPriority(RTSBuffer)
24
25     Add_MAC_Header(SCTSPacket, DataType, DestinationID, SourceID, TxPriority)
26     Add_MAC_Footer(SCTSPacket, CRC)
27     SendPacket(SCTSPacket, To_LowerLayer)
28
29     WaitPacket(DataPacket)
30
31   DATA:
32     RDataPacket <- tmpPacket
33     SendPacket(RDataPacket, To_UpperLayer)
34
35   OTHERS:
36     Quite ()
37
38 ENDCASE
39 ENDIF

```

그림 12. 수신 노드의 의사코드

Fig. 12. Pseudo Code for Sender.

```

1  IF NodeMode == TxMode THEN
2  // by using USART Interrupt-Driven Communication
3
4  PacketTypeToSend    NEW tmpPacket, SRTSPacket, SDataPacket
5  PacketTypeToReceive NEW RCTSPacket
6
7  SDataPacket <- ReceivePacket(Data, From_UpperLayer)
8  Add_MAC_Header(SDataPacket, DataType, DestinationID, SourceID)
9  Add_MAC_Footer(SDataPacket, CRC)
10
11  Add_MAC_Header(SRTSPacket, DataType, DestinationID, SourceID, DataAttribute)
12  Add_MAC_Footer(SRTSPacket, CRC)
13  SendPacket(SRTSPacket)
14
15  WHILE ExpeireTime DO
16    WaitPacket(CTSPacket)
17    tmpPacket <- ReceivePacket(Packet, From_LowerLayer)
18    IF tmpPacket == CTSPacket THEN
19      RCTSPacket <- tmpPacket
20    ENDIF
21  ENDWHILE
22
23  GetPriority(RCTSPacket)
24  WaitTxTurn()
25  SendPacket(SDataPacket, To_LowerLayer)
26
27 ENDIF

```

그림 13. 송신 노드의 의사코드

Fig. 13. Pseudo Code for Receiver

PHY-MAC 프리미티브^[17]를 이용한다. 그림 12와 13은 인터럽트 구동 방식을 기반으로 동작하는 제안한 MAC 프로토콜에 대한 수신 노드와 송신 노드 측의 의사 코드를 나타낸 것이다.

5. 실험 결과 및 분석

본 논문에서 제안한 RTS Waiting Time 기반 MAC 프로토콜과 기존의 MACA 기반 MAC 프로토콜을 실제로 구현하여 두 MAC 프로토콜 간의 성능을 비교한다. 데이터 처리량, 패킷 수신 실패율, 평균 전송 시간, 에너지 소모량, 채널 이용률 등 전반적인 측면에서 제안한 MAC 프로토콜이 기존의 MAC 프로토콜에 비하여 우수한 성능을 보여주고 있다.

그림 14는 두 MAC 프로토콜의 데이터 처리량을 나

그림 14. 데이터 처리량

Fig. 14. Throughput.

그림 15. 패킷 수신 실패율

Fig. 15. Packet Drop Rate.

타낸다. 전송 시간에 따라서 성공적으로 수신된 데이터의 양을 표현한 것으로 제안한 MAC 프로토콜이 단위 시간 당 데이터 처리량이 높은 것을 알 수 있다.

그리고 그림 15의 패킷 수신 실패율의 경우, 기존 MACA 기반 프로토콜은 실험 초반에 RTS/CTS 패킷과 데이터 패킷 간의 충돌이 많이 발생하여 패킷 수신 실패율이 높게 나타났다. 또한 전송 시간이 경과함에 따라 패킷 수신 실패율이 점차적으로 증가하는 것에 비해, 제안한 MAC 프로토콜은 패킷 수신 실패율이 약 30% 정도로 비교적 안정적으로 패킷을 수신하고 있다.

그림 16은 전송 횟수에 따른 평균 전송 시간을 나타낸다. 제안한 MAC 프로토콜이 기존 MACA 기반 MAC 프로토콜보다 평균 전송 시간이 낮다는 것을 알 수 있다. 기존에 비해 RTS/CTS handshaking과 데이터

그림 16. 평균 전송 시간

Fig. 16. Average Transmission Time.

그림 17. 에너지 소비량

Fig. 17. Energy Consumption.

그림 18. 채널 이용률
Fig. 18. Channel Utilization.

송·수신을 처리하는 시간이 적으므로 보다 신속하게 데이터를 전달 할 수 있으며, 이는 데이터 신뢰성 측면에서 본 논문에서 제안한 MAC 프로토콜이 우수하다는 것을 보여준다.

그림 17의 꺾은선 그래프는 각 MAC 프로토콜에 대한 전체 에너지 소비량을 나타내며, 막대 그래프는 각 전송 주기마다 소비된 에너지량을 나타낸다. RTS/CTS handshaking 동안에 소비되는 에너지량뿐만 아니라 RTS/CTS handshaking 성공 시 전송 기회를 얻는 노드가 데이터 패킷을 보낼 때 소비되는 에너지량까지 포함시켰다. 제안한 MAC 프로토콜은 여러 개의 RTS 패킷을 수신하여 하나의 CTS 패킷을 전송하므로, 각 RTS 패킷마다 CTS 패킷을 회신하는 기존의 MACA 기반 MAC 프로토콜보다 에너지를 적게 소비한다.

수중 채널이 신뢰성 있게 데이터를 처리할 수 있는 최대 정보량을 수중 모뎀의 데이터 전송률인 초당 50bits로 설정하여 채널 이용률에 대한 실험을 진행하였다. 그림 18을 보면, 제안한 MAC 프로토콜이 기존의 MACA 기반 MAC 프로토콜보다 채널 이용률이 높다는 것을 알 수 있다. 채널 이용률이 높다는 것은 단위 시간 내에 그만큼 많은 데이터를 처리할 수 있다는 것을 의미하는데, 앞에서 살펴보았던 그림 14의 데이터 처리량을 통해 이를 증명할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 수중 매체의 특성 중의 하나인 긴 전

송 지연을 고려한 수중 모바일 애드 혹 네트워크 기반의 MAC 프로토콜을 제안하였다. 특히, 이에 효율적인 3-way handshaking 방식(RTS/CTS/DATA)을 채택하였으며 기존 방식의 문제점인 RTS 패킷과 CTS 패킷 간의 충돌을 회피할 수 있는 방법을 제시하였다. RWT 시간 동안 다수의 RTS 패킷을 수신한 후, 하나의 CTS 패킷을 송신하는 방법을 통하여 에너지 소모를 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 데이터 전송의 비효율성 또한 극복할 수 있다.

그리고 제안한 MAC 프로토콜은 현재 구현이 가능한 기술을 통하여 수중 모바일 애드 혹 네트워크에 실질적으로 적용이 가능한 MAC 프로토콜로서, 수중 환경의 여러 특성들을 고려한 가변적 RWT 시간을 설정하여 이동 노드의 움직임에 따른 다양한 네트워크의 크기를 반영한다. 또한 전송 우선순위 부여 정책을 통하여 수중 환경 감시 시스템에서의 우선순위가 높은 메시지를 먼저 처리할 수 있도록 함으로써 데이터의 신뢰성을 보장할 수 있다.

마지막으로 실제 구현 및 실험을 통하여 제안한 MAC 프로토콜과 기존의 MACA 기반의 MAC 프로토콜의 성능 평가를 실시하였다. 그 결과 데이터 처리량, 평균 전송 시간, 에너지 소모량, 패킷 수신 실패율, 채널 이용률 측면에서 제안한 MAC 프로토콜의 우수성을 검증하였으며, 그에 대한 효율성을 입증할 수 있었다.

향후 연구에서는 사용자의 요구에 따라 이동 속도가 바뀔 수 있는 노드에 유연한 RWT 시간과 전송 대기 시간을 설계 및 구현하여, 보다 정교한 수중 모바일 애드 혹 네트워크 기반의 MAC 프로토콜이 될 수 있도록 최적화 작업을 진행할 예정이다.

REFERENCES

- [1] Lee, J. Y., Yun, N. Y., Muminov, S., Shin, S. Y., Ryuh, Y. S. and Park, S. H., "A Focus on Practical Assessment of MAC Protocols for Underwater Acoustic Communication with Regard to Network Architecture," IETE Technical Review Vol. 30, no. 5, pp. 375-381, September 2013.
- [2] de Moraes Cordeiro, Carlos and Dharma P. Agrawal. Ad hoc and sensor networks: theory and applications, World Scientific, 2011.
- [3] Akyildiz, Ian F., Dario Pompili and Tommaso

- Melodia. "Underwater acoustic sensor networks: research challenges," *Ad hoc networks* Vol. 3, no. 3, pp. 257-279, May 2005.
- [4] Stojanovic, Milica. "Recent advances in high-speed underwater acoustic communications," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 21, no. 2, pp. 125-136, April 1996.
- [5] Kilfoyle, Daniel B. and Arthur B. Baggeroer, "The state of the art in underwater acoustic telemetry," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 25, no. 1, pp. 4-27, January 2000.
- [6] Catipovic, Josko A. "Performance limitations in underwater acoustic telemetry." *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 15, no. 3, pp. 205-216, July 1990.
- [7] Forouzan, A. Behrouz, *Data Communications & Networking*, The McGraw-Hill Education, 2007.
- [8] Abramson, Norman, "THE ALOHA SYSTEM: another alternative for computer communications," in *Proc. of fall joint computer conference*, ACM, pp. 281-285, November 17-19, 1970.
- [9] Kleinrock, Leonard and Fouad Tobagi, "Packet switching in radio channels: Part I carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics," *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 23, no. 12, pp. 1400-1416, December 1975.
- [10] Karn, Phil, "MACA-a new channel access method for packet radio," *ARRL/CRRL Amateur radio 9th computer networking conference*. Vol. 140. pp. 134-140, September 1990.
- [11] Bharghavan, Vaduvur, et al., "MACAW: a media access protocol for wireless LAN's," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. Vol. 24, no. 4, pp. 212-225, October 1994.
- [12] Fullmer, Chane L. and J. J. Garcia-Luna-Aceves. "Floor acquisition multiple access (FAMA) for packet-radio networks," *ACM SIGCOMM computer communication review*, Vol. 25, no. 4, pp. 262-273, October 1995.
- [13] Molins, Marcal and Milica Stojanovic, "Slotted FAMA: a MAC protocol for underwater acoustic networks," in *Proc. of OCEANS 2006-Asia Pacific*, pp. 1-7, May 2007.
- [14] Chirdchoo, Nitthita, Wee-Seng Soh and Kee Chaing Chua, "MACA-MN: A MACA-based MAC protocol for underwater acoustic networks with packet train for multiple neighbors," in *Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference*, pp. 46-50, May 2008.
- [15] Ng, Hai-Heng, Wee-Seng Soh and Mehul Motani, "MACA-U: A media access protocol for underwater acoustic networks," in *Proc. of IEEE Global Telecommunications Conference*, pp. 1-5, November 2008.
- [16] Yun, N. Y., Shin, S. W., Muminov, S., Park, S. H., Jeon, J. H., Won, T. H., ... and Ryuh, Y. S, "Interrupt driven mechanism for biomimetic fish-robot control system based on underwater acoustic communication," in *Proc. of The Sixth ACM International Workshop on UnderWater Networks (WUWNet)*, December 2011.
- [17] Kim J. E., Yun N. Y., Shin S. Y., Namgung J. I., Kim Y. P., Park S. H., Jeon J. H., Park S. J., Kim C. H., "PHY-MAC Primitive for Underwater Acoustic Communication," in *Proc. of The 2011 Fall Conference of Korean Institute of Communications and Information Sciences (KICS)*, 2011.

— 저 자 소 개 —

이 진 영(학생회원)
2011년 국민대학교 비즈니스IT
학사 졸업.
2014년 국민대학교 비즈니스IT
석사 졸업.

<주관심분야 : 유비쿼터스 시스템, 임베디드 소프트웨어, 수중통신>

윤 남 열(학생회원)
2003년 안동대학교 정보통신공학
학사 졸업.
2009년 국민대학교 비즈니스IT
석사 졸업.
2014년 국민대학교 비즈니스IT
박사 졸업.

2014년~현재 해양센서네트워크기술연구센터
연구원.

<주관심분야 : 센서네트워크, 수중통신>

박 수 현(평생회원)-교신저자
1988년 고려대학교 컴퓨터학과
학사 졸업.
1990년 고려대학교 전산학
석사 졸업.
1998년 고려대학교 컴퓨터학과
박사 졸업.

1999년~2002년 동의대학교 컴퓨터소프트웨어공
학과 조교수.

2002년~현재 국민대학교 경영정보학부 교수.

<주관심분야 : 유비쿼터스 시스템, 컴퓨터통신,
무선네트워크>