

수중 네트워크의 전파 비대칭성을 고려한 BTB-TDMA 성능 분석

조아라* · 윤창호 · 임용곤

Performance analysis of BTB-TDMA considering asymmetry of propagation delays in UANets

A-ra Cho* · Changho Yun · Yong-kon Lim

Ocean Engineering Research Department, KRISO, 104 Sinseong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 305-343, Korea

요약

수중 음향네트워크에서 노드의 위치와 이동속도에 따라 변화하는 전파지연 시간을 추정하여 시간 블록이라는 새로운 슬롯 단위로 노드들의 전송 스케줄을 설정하는 Block-Time-Bounded Time Division Multiple Access (BTB-TDMA) 매체접속제어 방식이 제안되었다. 본 논문에서는 노드의 이동으로 인해 상향 (uplink)과 하향 (downlink)의 전파지연이 비대칭적이 되고, 이에 따른 수신 충돌이 BTB-TDMA의 성능에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해 분석한다. 이를 위해 전파지연 비대칭성으로 인한 수신 충돌률, 채널접속지연, 채널효율을 수학적으로 모델링하고, 수중노드의 수, 네트워크 범위, 수중노드의 이동 속도에 따라 BTB-TDMA 시간 블록의 길이를 변화시켜 광범위한 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션 결과의 분석을 통해, 네트워크 환경에 따라 수신 충돌을 최소화 하면서, 채널 접속지연과 채널효율 성능을 최대화할 수 있는 시간 블록 값을 도출할 수 있는 성능지표를 제시한다.

ABSTRACT

A Block-Time-Bounded Time Division Multiple Access (BTB-TDMA) medium access control protocol, which estimates the propagation delay of nodes according to their location and moving velocity information, has been proposed for underwater acoustic networks. BTB-TDMA provides nodes with their transmission schedules by a time block that is a time unit, newly designed for BTB-TDMA. In this paper, we investigate how the receiver collision, that is induced by the asymmetry between node's uplink and downlink propagation delay due to its mobility, affects the performance of BTB-TDMA. To do this, we analytically obtain the collision rate, the channel access delay, and the channel utilization by considering the asymmetry of propagation delay. Then, simulations are extensively performed with respect to the length of a time block by varying the number of nodes, the network range, and the node's velocity. Thus, the simulation results can suggest performance criteria to determine the optimal length of a time block which minimizes the collision rate and concurrently maximizes the channel access delay and the channel utilization.

키워드 : 수중음향 네트워크, 매체접속 제어, 시간분할 접속, 이동 수중노드, 전파지연, 비대칭성

Key word : Asymmetry, MAC, Mobile underwater node, TDMA, Propagation delay, Underwater acoustic networks(UANets)

접수일자 : 2014. 10. 28 심사완료일자 : 2014. 11. 18 게재확정일자 : 2014. 12. 02

* **Corresponding Author** A-ra Cho(E-mail:zoazoa@kriso.re.kr, Tel:+82-42-866-3861)

Ocean Engineering Research Department, KRISO, 104 Sinseong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 305-343, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.1.50>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

해양에 대한 관심이 증대됨에 따라 수중음향 네트워크(UANet: Underwater Acoustic Network) 기술을 접목한 다양한 어플리케이션이 소개되고 있다. UANet 어플리케이션은 해저지형 탐사, 지진 및 쓰나미 경고, 해양 환경 감시, 해양 방어체제 [1] 등이 있으며, 이러한 어플리케이션을 수중에 구현하기 위해서는 수중네트워크의 제한적 요소들을 (매우 긴 전파지연 (1500m/s), 열악한 수중 채널로 인한 높은 비트 에러율, 주파수 사용 제약에 따른 제한된 대역폭, 충전의 어려움으로 인한 제한적 전력소비[2]) 고려해야한다. 특히, 매우 긴 전파지연 시간을 극복하고자 UANet을 위한 시간분할방식(TDMA: Time Division Multiple Access) 매체접속 제어들(MAC: Medium Access Control)이 제안되어 왔다 [3-6]. 이는 노드 간 접속 경쟁을 피해 패킷 충돌로 인한 재전송을 막고, 전파지연 시간을 고려하여 노드의 전송 스케줄을 정하는 MAC이다. 이러한 TDMA MAC에서 수중 노드는 대부분 추진력이 없는 고정 노드로 해류에 의한 이동성만을 고려한다. 그러나 최근의 UANet 어플리케이션에서는 무인 잠수정(AUV: Autonomous Underwater Vehicle), 글라이더, 잠수함 과 같이 추진력을 가진 이동노드들이 임의 속도로 자유자재로 토폴로지가 변형하는 네트워크구조를 가진다.

이처럼 수중에서 추진력을 가진 이동노드를 고려한 UANet 어플리케이션을 위해, BTB-TDMA (Block Time Bounded TDMA) [7]가 제안되었다. BTB-TDMA는 노드 간 전파지연 시간과 노드의 이동 속도를 고려하여 한 주기 동안 변화되는 노드의 전파지연시간을 추정하여 전송 스케줄을 정한다. 추정된 전파지연 (ED: Estimated Delay)은 BTB-TDMA의 시간 슬롯 단위인 시간블록 (time block) τ_b 를 통해 표현되며, 노드의 전송시각은 여러 개의 τ_b 로 구성된 ED에 따라 결정된다. 따라서 τ_b 의 길이에 따라 BTB-TDMA의 성능이 크게 달라질 수 있으며, 이에 따라 [7]에서는 채널접속시간과 채널효율 측면에서 성능 평가를 수행하였다. 이 때, 노드의 전파지연 시간은 대칭적이라는 가정 하에 상향링크와 하향링크의 전파지연 시간을 동일하게 간주하였다. 그러나 추진력을 지닌 이동노드는 임의의 속도로 계속 이동 중이므로 상향링크와 하향링크의 전파지연 값과 동일하지 않다. 이러한 노드의 전파지연 시간 비

대칭성으로 인해 전파지연시간을 활용한 전송 스케줄은 오류가 발생할 수 있으며, BTB-TDMA 성능도 달라질 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 시뮬레이션을 통해 노드의 전파지연 비대칭성을 고려한 BTB-TDMA 성능평가를 수행한다. 이를 위해 전파지연 비대칭성으로 인한 데이터 패킷의 수신 충돌률(CR: Collision Rate)을 정의하고, 데이터 전송에 성공한 유효 패킷에 대한 채널접속 지연 (CD: Channel Delay)과 채널효율(CU: Channel Utilization)을 재정의한다. 시뮬레이션은 전파지연 비대칭성을 고려할 때와 고려하지 않을 때 τ_b 의 길이에 따라 변화되는 BTB-TDMA의 CR, CD, CU 성능을 비교한다. 또한, 네트워크 환경변화를 고려하여 네트워크 범위, 수중노드의 수, 수중노드의 이동 속도에 따른 성능 분석을 통해 시간블록 τ_b 의 길이를 결정할 수 있는 성능지표를 제시한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 BTB-TDMA의 목표 어플리케이션인 UANet 구조를 소개하고, 제 3장에서는 BTB-TDMA에 대해 간략하게 설명한다. 제 4장에서는 BTB-TDMA 성능분석을 위한 성능파라미터 정의와 시뮬레이션을 수행하고, 마지막으로 제 5장에서 향후 연구 계획과 함께 논문을 마무리 짓는다.

II. UANet 구조

본 장에서는 목표 UANet의 전반적인 구조를 설명한다. 그림 1에서 나타나는 바와 같이 UANet은 수중노드(UN: Underwater node), 마스터 노드(MN: Master node), 중앙 지휘선박, 연안국, 위성으로 구성된다. 무인 잠수정 (AUV: Autonomous underwater vehicle)과 같이 수중노드는 임의의 속도로 자유롭게 움직이며 마스터 노드의 명령에 따라 지정된 위치에서 해양자료를 수집하거나 다른 노드들과 협업 작업을 수행한다. 마스터 노드는 부이와 같은 형태로 해수면에 고정되어 위치하며, 수중노드로부터 수집한 데이터를 중앙 지휘선박이나 연안국으로 전달하거나 수중노드에 명령을 전달한다. 이러한 역할을 수행하기 위해 마스터 노드에는 2종류의 트랜스미버가 장착되는데, 수중노드와의 통신을 위한 수중음향 트랜스미버와 연안국이나 해수면에 위치한 노드들과의 통신을 위한 RF 트랜스미버이다. 중

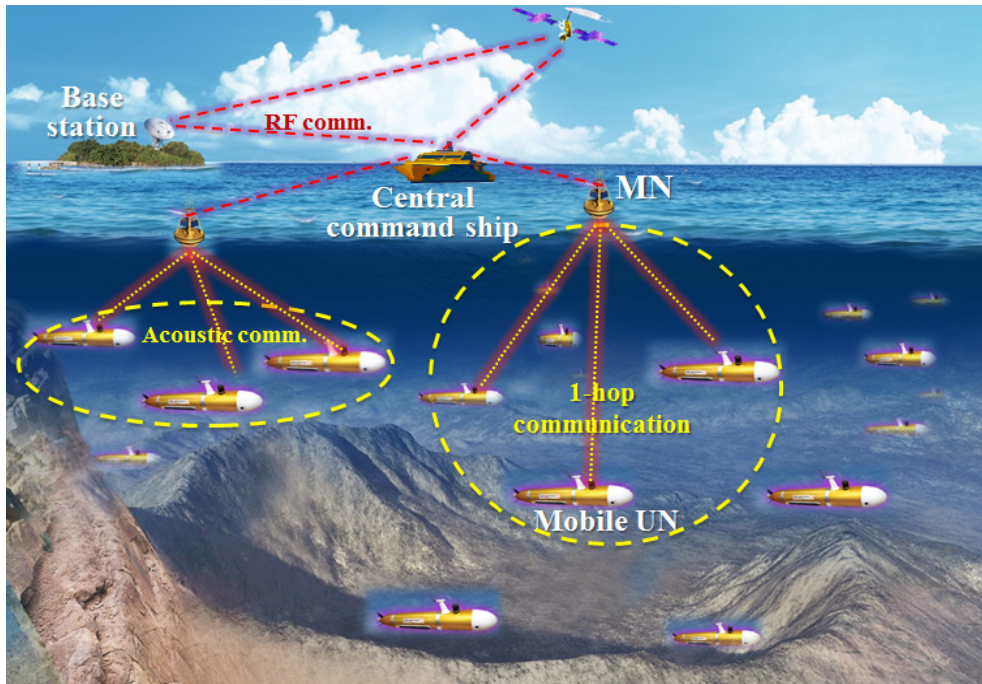


그림 1. 수중음향 네트워크 구조
Fig. 1 The architecture of underwater acoustic networks

양 지휘선박은 해수면에서 이동하며 수중 임무에 대한 명령을 내리거나 마스터 노드로부터 수집한 데이터를 연안국이나 위성으로 전송한다. 중앙 지휘선박은 여러 종류의 트랜스시버를 장착하여, HF (High frequency), VHF (Very-high frequency) 대역 트랜스시버와 위성 통신을 위한 트랜스시버들을 이용하여 통신한다. 연안국은 육상 백본 네트워크와 연결되어 수중에서 수집된 여러 종류의 데이터를 서버에 저장하고, 실시간으로 수집된 데이터를 액세스하여 모니터링할 수 있도록 한다.

UANet 전반적인 동작은 다음과 같이 요약된다. 먼저 중앙 지휘선박국이 마스터 노드에게 명령하여 수중노드로부터 수집된 해양 데이터를 전달하도록 한다. 명령을 받은 마스터 노드는 수중음향 트랜스시버를 이용하여 수중노드에게 비콘 메시지를 이용하여 해양데이터 수집을 명령을 브로드캐스팅한다. 비콘을 수신한 수중노드는 할당된 시간슬롯에 따라 수집한 데이터를 마스터 노드에게 전송한다. 이러한 데이터를 수신한 마스터 노드는 중앙 지휘선박으로 데이터를 전달하고, 중앙 지휘선박은 수신된 데이터를 연안국에 전송한다. 연안국

에서는 수집된 데이터를 육상 백본 네트워크를 통해 서버에 저장하거나 인터넷에서 데이터를 자유롭게 접속하여 정보를 이용할 수 있도록 한다.

III. BTB-TDMA

3.1. BTB-TDMA 프레임 구조

본 장에서는 BTB-TDMA 구조와 프로토콜 동작 절차에 대해 간략히 소개하도록 한다. 그림 2는 BTB-TDMA의 프레임 구조이며, 초기화 과정을 위한 프레임과 데이터 전송을 위한 프레임으로 크게 2종류로 나뉘며, 다음과 같은 파라미터로 구성된다.

- τ_{max} : 네트워크 범위에 따른 수중노드의 최대 전파 지연 시간이다.
- τ : 하나의 데이터 패킷 전송하는 데 소요되는 전송 지연 시간으로 패킷 길이와 데이터 속도에 따라 달라진다.
- τ_b : BTB-TDMA에서 사용하는 데이터 시간블록

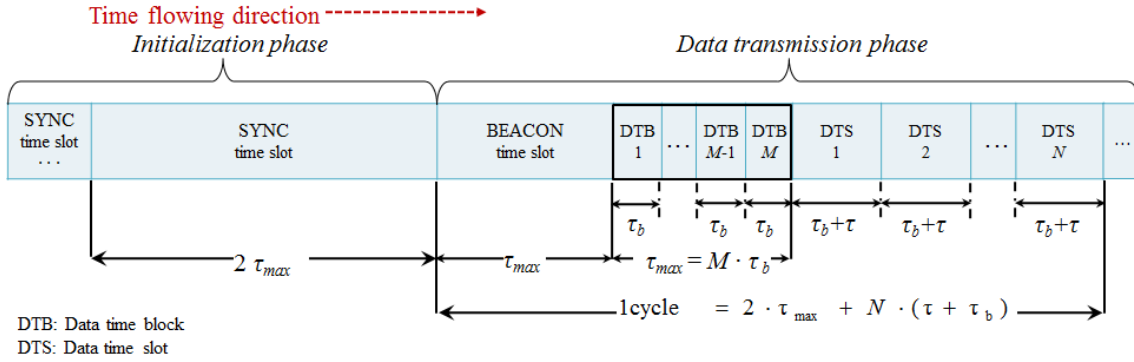


그림 2. BTB-TDMA 프레임 구조
Fig. 2 The frame structure of BTB-TDMA

(Data time block)으로 시간슬롯의 길이를 결정하는 기본 단위가 된다. τ_b 가 작을수록 BTB-TDMA에서 세밀한 시간범위를 줄 수 있다.

- M : 최대 데이터 시간블록 수로 $M = \tau_{max} / \tau_b$ 가 된다.
- N : 네트워크 범위 내에 위치한 수중노드의 수이다.

초기화 과정을 위한 프레임은 동기화(SYNC) 패킷을 전송하기 위해 여러 SYNC 시간 슬롯으로 구성되며, 슬롯 길이는 수중노드가 패킷을 받아서 응답하는 데까지 소요되는 최대 시간인 $2\tau_{max}$ 가 된다. 데이터 전송을 위한 프레임은 비콘 전송을 위한 비콘 시간슬롯과 M 개의 데이터 시간블록과 N 개의 데이터 시간슬롯으로 구성된다. 비콘 시간슬롯의 길이는 τ_{max} 이고, 데이터 시간슬롯 길이는 패킷전송시간 τ 와 시간슬롯의 단위길이인 τ_b 합이다.

3.2. BTB-TDMA 동작 절차

BTB-TDMA는 초기화 과정은 마스터 노드가 SYNC 패킷을 브로드캐스팅하여 수중노드의 응답 메시지 수신을 통해 각 수중노드의 왕복지연시간 (RTT: Round trip time)을 계산하여 수중노드와 마스터 노드 간 전파지연 시간을 획득하는 과정이다. 이는 수중 전파지연 시간이 대칭적이라는 가정 하에 이루어진다. BTB-TDMA는 위치추적 기법을 이용하여 수중노드의 위치를 계속적으로 추적하고 전파지연시간 변화량을 추정하여 데이터 전송을 위한 시간슬롯을 할당한다. 추정된 전파지연 시간 ED는 시간 길이에 따라 긴 순서대로 수

중 노드의 패킷 전송 순서가 결정되며, i 번째 전송순서의 ED_i 는 τ_b 를 이용하여 다음과 같이 분류된다.

$$K_i = \left\lfloor \frac{ED_i}{\tau_b} \right\rfloor \quad (1)$$

여기서 K_i 는 ED_i 의 길이에 따라 구성된 τ_b 개수이며, 이를 기준으로 수중노드의 데이터 전송을 위한 시작시간 $BTBstart_i$ 과 종료 시간 $BTBend_i$ 이 다음과 결정하게 된다.

$$\begin{aligned} BTBstart_i &= 2\tau_{max} + (i-1)(\tau + \tau_b) - (K_i - 1)\tau_b \\ BTBend_i &= 2\tau_{max} + i(\tau + \tau_b) \end{aligned} \quad (2)$$

수중노드의 초기화 과정이 완료되면 마스터 노드는 비콘을 통해 수중노드의 데이터 전송을 위해 할당된 시간정보를 브로드캐스팅한다. 비콘을 수신한 수중노드는 $BTBstart$ 시각에 데이터 패킷을 전송하고, 마스터 노드로 전송된 데이터 패킷은 BTB_{end} 내에 수신이 완료된다.

IV. 성능 평가

본 장에서는 시뮬레이션을 통해 전파지연 비대칭성을 고려한 BTB-TDMA 성능 분석을 수행한다. 먼저, 전파지연의 비대칭성으로 인한 패킷 수신 충돌률을 도출

하고, 패킷 수신충돌에 따른 영향을 고려하여 [7]에서 정의되었던 채널 접속지연시간과 채널효율을 재정의한다. BTB-TDMA 성능 분석을 위해 먼저 네트워크 파라미터를 표 1과 같이 정의한다.

표 1. 네트워크 파라미터 정의
Table. 1 Network parameter description

파라미터	설명
N	수중 노드 수
i	수중 노드 색인 ($1 \leq i \leq N$)
CYC	전송 주기의 횟수
j	주기 색인 ($1 \leq j \leq CYC$)
$TXp_i(j)$	수중 노드 i 가 j 번째 전송 주기에서 송신한 패킷
$RXcp_i(j)$	j 번째 전송 주기에서 수중 노드 i 의 송신 패킷이 수신 시, 충돌된 패킷
$Pc_i(j)$	j 번째 전송주기에서 수중 노드 i 의 패킷 충돌 확률
$CD_i(j)$	j 번째 전송주기에서 수중 노드 i 의 전송 성공한 패킷에 대한 채널 접속 지연
$a_i(j)$	j 번째 전송 주기에서 수중 노드 i 의 패킷 전송 종료 시간
$b_i(j)$	j 번째 전송 주기에서 수중 노드 i 의 패킷 전송 시작 시간
$OC(j)$	j 번째 전송 주기에서의 한 주기의 길이
$CU(j)$	j 번째 전송주기에서 전송 성공한 패킷에 대한 채널 효율

4.1. 수신 충돌률 (CR)

CR은 한 전송 주기 동안 수중노드가 송신한 총 데이터 패킷 수에 대한 충돌된 수신 패킷 수의 비율이다. 이때의 충돌된 수신 패킷은 수중노드의 전송 스케줄을 정할 때 전파지연의 비대칭성을 고려하지 않아 수신 단에서 할당된 시간 슬롯 내에 패킷을 수신하지 못할 때 발생한다. 즉, 수중노드의 전파지연 추정 시, 패킷이 전송되는 동안 노드의 이동으로 인해 변화된 전파지연 시간을 고려하지 않아 할당된 시간이 아닌 다른 시간 슬롯에 패킷 수신이 완료되어 수신 출동을 일으키게 된다. 수중 노드 i ($1 \leq i \leq N$)의 j ($1 \leq j \leq CYC$)번째 전송 주기에 대한 평균 패킷 수신 충돌률은 총 보낸 패킷의 수 ($TXp_i(j)$)와 수신 충돌이 발생한 패킷의 수 ($RXcp_i(j)$)의 비율로 표현될 수 있다. 주기와 노드들에 대해 평균을 취한 평균 수신 충돌률을 CR이라 정의

하면, CR은 다음과 같이 도출된다.

$$CR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{CYC} \sum_{j=1}^{CYC} \frac{RXcp_i(j)}{TXp_i(j)} \right] \quad (3)$$

4.2. 채널 접속지연 (CD)

데이터 전송에 성공한 유효 패킷에 대한 채널 접속 지연 CD는 수중노드가 전송 성공한 유효 데이터 패킷에 대해 채널 접속을 위해 소요된 지연 시간이다. 즉, 수중노드가 유효 데이터 패킷 송신 완료한 시점부터 유효 데이터 패킷 송신 시작 시점까지 소요한 시간으로, CR이 높을수록 패킷 충돌이 잦아져서 유효데이터 송신을 위해 수중노드의 채널 접속 소요시간도 길어진다. CD 성능 파라미터 유도를 위해 다음과 같은 가정을 한다.

- 수중노드는 $j-1$ 번째 전송 주기에서 성공적으로 데이터 패킷 전송완료한 후 j 번째 전송주기에서 데이터 패킷 전송을 시작한다.
- j 번째 전송 주기에서 수중노드가 전송을 시작한 이후 l 번째 전송 주기에서 데이터 패킷을 성공적으로 전송한다. 따라서 l 은 j 보다 크거나 같다 ($j \leq l$)

CD를 구하기 위해, 먼저 $CD_i(j)$ 를 도출하도록 한다. 만약, $l=j$ 이면, 수중노드는 충돌없이 패킷을 전송을 하므로, 그림 3에서 보듯이 $CD_i(j)$ 는 $a_i(j)$ 와 $b_i(j+1)$ 의 합이 된다. 즉, $CD_i(j)$ 는 수중노드가 j 번째 주기에서 패킷을 송신한 시간부터 $j+1$ 주기에서 새로운 패킷을 전송하기 직전까지의 시간이다. 만약, $l > j$ 이면, 노드 i 가 송신한 패킷이 j 번째 주기부터 l 주기까지 연속해서 수신 충돌이 발생했다는 것을 의미하며 이는 $a_i(j)$ 와 $b_i(l+1)$ 과 $\sum_{h=j+1}^{h=l} OC(h)$ 의 합이 된다.

여기서, BTB-TDMA에서 $OC(h)$ 는 전송주기에 상관없이 일정하며 다음과 같이 표현된다.

$$OC = 2\tau_{\max} + N(\tau_b + \tau) \quad (4)$$

우리는 l 의 모든 경우 ($j \leq l \leq CYC-1$)와 수신 충돌률 $Pc_i(l)$ 을 고려하여 $CD_i(j)$ 를 다음과 같이 도출한다.

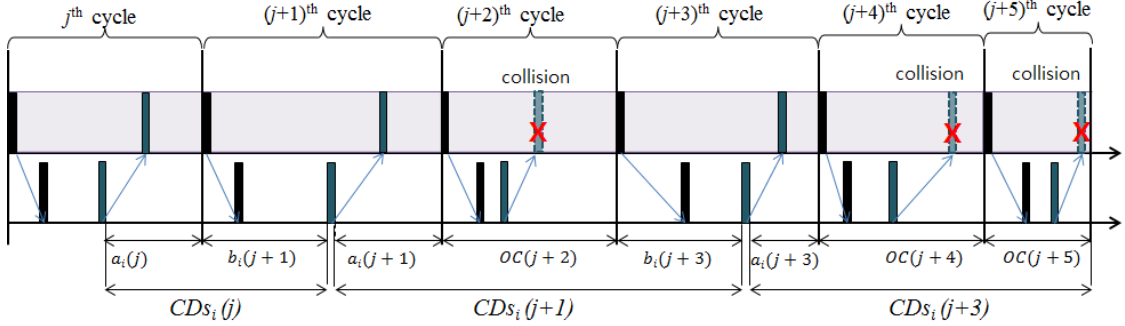


그림 3. 패킷 수신 충돌률에 의한 전송주기 별 채널 접속 지연 예
Fig. 3 An example of channel access delay according to transmission cycles with the effect of collision rate

$$CD_i(j) = \sum_{l=j}^{CYC-1} \left\{ \left[a_i(j) + b_i(l+1) + \sum_{h=j+1}^{h=l, l>j} OC(h) \right] \cdot \left[\prod_{h=j}^{h=l-j-1, l>j} Pc_i(h) \right] (1 - Pc_i(l+1)) \right\} \quad (5)$$

수는 줄어들게 되므로 CU의 성능은 낮아지게 된다. 전송 주기 j 에 대한 $CU(j)$ 는 다음과 같다.

$$CU(j) = \frac{N \cdot \tau \cdot (1 - Pc(j))}{OC(j)} \quad (8)$$

따라서 각 주기에 대한 수중노드 i 의 평균 CD는 $CD_i(j)$ 를 $i(1 \leq i \leq N)$ 와 $j(1 \leq j \leq CYC)$ 에 대해 평균을 취하면 구할 수 있으며, 다음과 같이 수식적으로 표현된다.

따라서 CU는 전송 주기 $j(1 \leq j \leq CYC)$ 에 대한 평균 CU로 구할 수 있으며, 다음과 같다.

$$CD = \frac{1}{N} \frac{1}{CYC} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{CYC-1} \sum_{l=j}^{CYC-1} \left\{ \left[a_i(j) + b_i(l+1) + \sum_{h=j+1}^{h=l, l>j} OC(h) \right] \cdot \left[\prod_{h=j}^{h=l-j-1, l>j} Pc_i(h) \right] (1 - Pc_i(l)) \right\} \quad (6)$$

$$CU = \frac{1}{CYC} \left[\sum_{j=1}^{CYC} \frac{N \cdot \tau \cdot (1 - Pc(j))}{OC(j)} \right] = \frac{1}{CYC} \left[\sum_{j=1}^{CYC} \frac{N \cdot \tau \cdot (1 - Pc(j))}{2\tau_{max} + N(\tau_b + \tau)} \right] \quad (9)$$

전파지연의 비대칭성으로 인한 수신충돌이 없으면 채널접속 지연 CD_{symm} 는 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

앞서 CD_{symm} 과 마찬가지로, 전파지연의 비대칭성으로 인한 수신충돌이 없으면 채널 효율 CU_{symm} 는 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$CD_{symm} = \frac{1}{N} \frac{1}{CYC} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{CYC-1} a_i(j) + b_i(j+1) \quad (7)$$

$$CU_{symm} = \frac{N \cdot \tau}{2\tau_{max} + N(\tau_b + \tau)} \quad (10)$$

4.3. 채널효율(CU)

전송 성공한 유효 데이터 패킷에 대한 CU는 한 전송 주기 동안 유효 데이터 패킷을 보내는데 소요된 시간 비로 정의된다. 즉, CR이 높을수록 유효 데이터 패킷의

4.4. 시뮬레이션 결과

BTB-TDMA의 성능 평가를 위한 시뮬레이션 네트워크 조건은 다음과 같다.

- 모든 수중노드는 전송주기에서 전송할 준비가 되어 있으며, 데이터 전송을 위한 할당되는 시간 슬롯의 수는 수중노드의 수 N 과 동일하다.

- 수중 노드들은 네트워크 범위 내에서 x, y, z 축으로 균등하게 분포되어 있으며, 초기 노드의 위치는 임의로 주어진다.
- 수중노드의 이동 속도는 최대 이동속도 내에서 임의의 속도로 움직인다.
- 수중노드는 일정한 트랙픽을 발생시키며, 데이터 속도는 8 [kbit/sec]이며, 패킷 길이는 500 바이트로 한 데이터 패킷을 전송하는 데 소요되는 시간은 τ 로 0.5 [sec]가 된다 [8].
- 전파지연의 비대칭성으로 인한 수신패킷 충돌만을 고려하고, 그 이외의 네트워크 환경에 의한 수신 충돌이나 수신오류에 의한 영향은 없다고 가정한다.
- BTB-TDMA의 τ_b 는 0.01:0.005:0.35 로 주어진다.

전파지연의 비대칭성에 대한 영향을 알아보기 위해, 전파지연이 대칭적일 때와 비대칭적일 때의 BTB-TDMA 성능을 τ_b 길이에 따라 시뮬레이션 한다. 실제 수중 네트워크에서 추진력을 가진 이동노드의 수는 비용과 제어측면에서 수십 대를 넘지 못한다. 또한, 통신 범위도 수십 m에서 수 km를 미만이며, 노드의 이동속도도 수 m/s 내외로 이동성을 가진다 [9]. 따라서, 이러한 수중네트워크 환경을 고려하여 다음과 같은 세 가지

- 경우의 네트워크 환경에서 시뮬레이션을 수행한다.
- 조건 A: 네트워크 범위가 1500m, 수중노드의 최대 이동속도는 5m/s이고, 수중노드의 수가 5, 25, 50개 일 때
 - 조건 B: 수중노드의 수가 25개, 수중노드의 최대 이동속도는 5m/s이고, 네트워크 범위가 500m, 1500m, 3000m일 때
 - 조건 C: 수중노드의 수가 25개, 네트워크 범위가 1500m이고, 수중노드의 최대 이동속도가 0.5m/s, 2.5m/s, 5m/s일 때

4.4.1. 조건 A

그림 4 (a)는 조건 A일 때 τ_b 에 따라 전파지연 비대칭으로 인해 발생하는 BTB-TDMA의 수신충돌률 CR을 나타낸다. 그림에서 보듯이 τ_b 가 커질수록 CR이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이는 BTB-TDMA에서 수중노드의 전파지연 추정시간에 따라 시간슬롯을 할당 시, 슬롯의 기본 단위가 되는 τ_b 가 커질수록 전파지연의 비대칭성으로 인한 전파지연 변화량을 포함한 시간슬롯을 할당할 수 있으므로 CR이 줄어드는 것이다. 또한, 노드의 수가 증가할수록 CR이 증가하는데, 이는 수중노드의 수 증가로 인해 수중 노드가 시간슬롯 할당을 위한 비콘

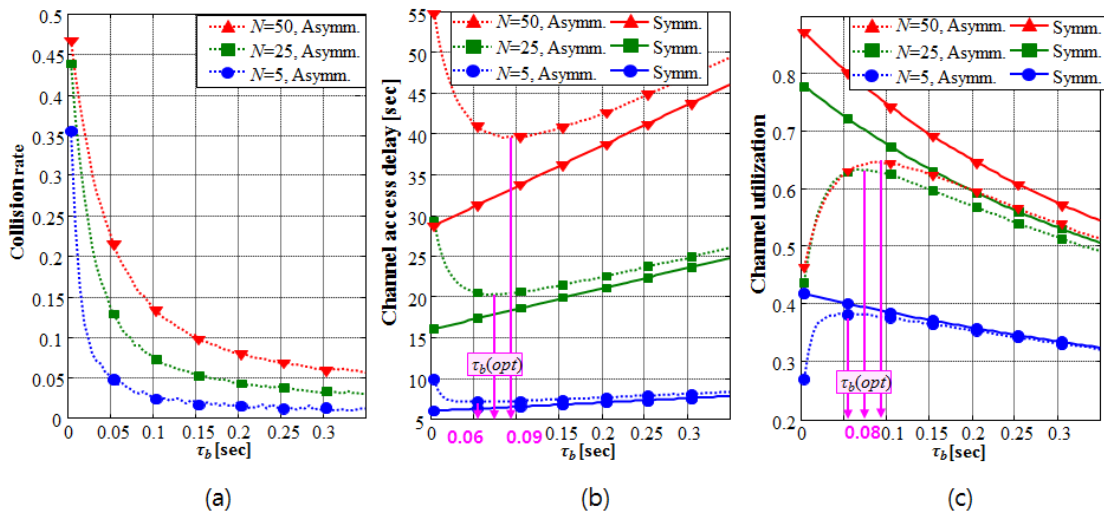


그림 4. 조건 A일 경우, BTB-TDMA 성능 (a) CR (N=5, 25, 50일 때) (b) CD (N=5, 25, 50일 때) (c) CU (N=5, 25, 50일 때)
Fig. 4 The performance of BTB-TDMA for case A (a) CR for N=5, 25, 50. (b) CD for N=5, 25, 50. (c) CU for N=5, 25, 50

신호 수신이후부터 패킷 전송 전까지의 대기 시간이 길어져 노드의 전파지연 시간 변화량도 커지기 때문이다. 그림 4 (a)에서 보듯이 동일한 CR 성능을 가질 때, 노드 수 증가에 따라 τ_b 가 커짐을 볼 수 있다. 따라서, BTB-TDMA의 CR 성능만을 고려한다면 τ_b 가 클수록 수신 충돌률은 낮아지며, 노드의 수가 증가할수록 수신 충돌을 줄이기 위해서는 τ_b 를 더욱 증가시켜야 한다.

그림 4 (b)-(c)는 τ_b 에 따라 전파지연의 비대칭성을 고려할 때와 고려하지 않을 때 BTB-TDMA의 CD와 CU 성능을 보여준다. 전파지연의 비대칭성을 고려하지 않을 때 τ_b 가 커질수록 BTB-TDMA의 CD와 CU 성능이 저하됨을 볼 수 있다. 이는 시간슬롯 단위인 τ_b 가 커짐에 따라 유희시간이 증가하게 되어 CD와 CU 성능이 저하되는 것이다.

반면, 그림 4 (b)에서 전파지연의 비대칭성을 고려한 BTB-TDMA의 CD 성능을 보면, τ_b 가 증가할수록 특정 값까지는 CD가 감소하다가 다시 증가하게 된다. 이는 τ_b 의 값이 특정 값 이하일 때는 BTB-TDMA의 CR에 대한 영향이 높아 수신충돌로 인한 유효 데이터 패킷에 대한 채널접속지연 시간 CD가 급격히 증가하게 된다. 따

라서 τ_b 이 특정 값 이하일 때는 τ_b 가 증가할수록 BTB-TDMA의 CR이 감소하게 되면서 CD도 감소하다가 특정 τ_b 값 이상일 때 CR의 감소율도 낮아지면서 τ_b 값의 증가에 따라 CD도 증가하게 된다. 마찬가지로 그림 4 (c)에서 CU의 경우도 특정 τ_b 값 이하일 때는 CR로 인해 τ_b 가 커질수록 수신충돌이 낮아져 유효 데이터에 대한 CU가 증가하지만 특정 τ_b 값 이상일 때는 유희시간 증가로 인해 CU가 감소하게 된다. 이처럼 전파지연 비대칭성을 고려한 BTB-TDMA의 CD와 CU는 특정 τ_b 값일 때, 성능이 최대가 되며, 이러한 τ_b 값을 $\tau_b(opt)$ 라고 하자. 그림 4 (b)-(c)에서 노드 수가 증가할수록 $\tau_b(opt)$ 가 0.06, 0.08, 0.09로 점차 증가하는 것을 볼 수 있으며, 이는 노드의 수가 증가할수록 BTB-TDMA의 CD와 CU의 성능을 최대화하는 τ_b 가 증가함을 알 수 있다.

4.4.2. 조건 B

그림 5 (a)는 조건 B의 경우일 때, τ_b 에 따라 변화되는 BTB-TDMA의 CR을 보여준다. 네트워크 범위가 증가할수록 CR이 증가하는데, 이는 네트워크 범위가 길어짐에 따라 노드의 평균 전파지연시간도 증가하게 되

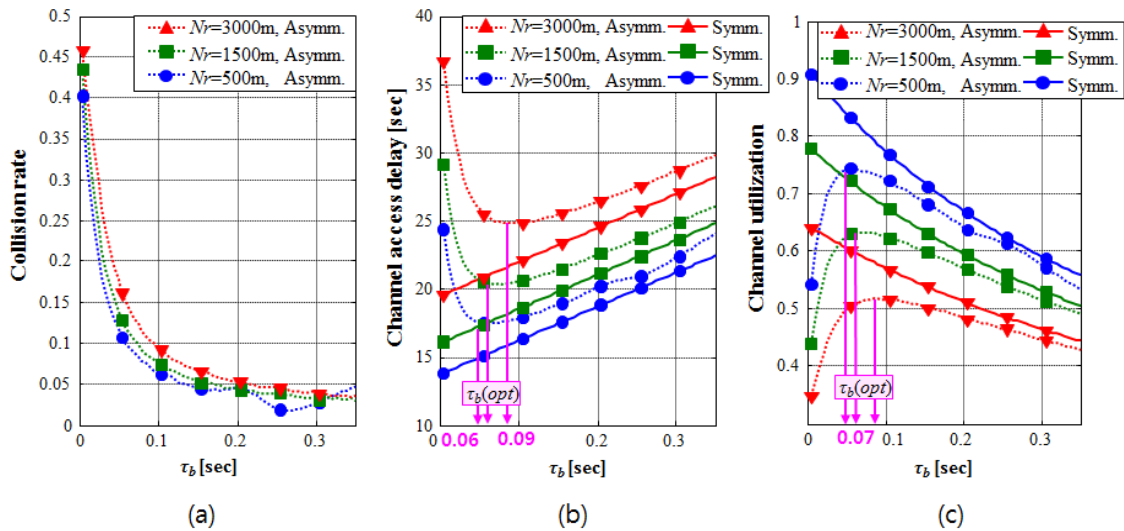


그림 5. 조건 B일 경우, BTB-TDMA 성능 (a) CR ($N_r=500, 1500, 3000m$ 일 때) (b) CD ($N_r=500, 1500, 3000m$ 일 때) (c) CU ($N_r=500, 1500, 3000m$ 일 때)

Fig. 5 The performance of BTB-TDMA for case B (a) CR for $N_r=500, 1500, 3000m$. (b) CD for $N_r=500, 1500, 3000m$. (c) CU for $N_r=500, 1500, 3000m$

어 전파지연 비대칭성이 커지기 때문이다. 즉, 증가한 평균 전파지연시간만큼 노드의 이동 거리도 늘어나게 되면서 전파지연시간 변화량도 증가하게 된다. 이는 BTB-TDMA의 전파지연시간 추정 오류를 증가시켜 패킷 송신을 위한 시간슬롯을 부정확하게 할당하게 되어 수신단에서 패킷 충돌을 일으키게 된다. 따라서, 네트워크 범위가 증가할수록 수신 충돌을 줄이기 위해서는 τ_b 를 더욱 증가시켜야 한다.

그림 5 (b)-(c)에서 보듯이 비대칭성을 고려한 BTB-TDMA의 CD와 CU 성능은 $\tau_b(opt)$ 일 때 최대가 되며, 네트워크 범위가 증가할수록 $N_r=500, 1500, 3000m$ 일 때, $\tau_b(opt)$ 는 0.06, 0.07, 0.09로 증가한다. 이는 네트워크 범위가 증가할수록 그림 5 (a)에서와 같이 CR이 증가하게 되므로 수신 충돌을 줄이면서 CD와 CU의 성능을 최대화하는 $\tau_b(opt)$ 값도 증가하게 되는 것이다.

4.4.3. 조건 C

그림 6 (a)는 조건 C일 때, τ_b 에 따라 변화되는 BTB-TDMA의 CR을 보여주며, 수중노드의 이동속도가 증가할수록 CR도 증가함을 볼 수 있다. 이는 수중노드의 이동속도가 증가할수록 노드의 이동성이 증가하여 전파지연 비대칭성도 증가하게 된다. 따라서 이로 인한

전파지연 추정치 오류가 증가하게 되고 이는 부정확한 시간슬롯 할당을 초래하여 CR이 증가하게 되는 것이다. 따라서 노드의 이동 속도가 증가할수록 τ_b 를 증가시켜야 수신 충돌을 줄일 수 있다.

그림 6 (b)-(c)는 전파지연 비대칭성을 고려할 때와 고려하지 않았을 때의 수중노드의 최대 이동속도에 따른 BTB-TDMA의 CD와 CU 성능을 보여준다. 전파지연의 비대칭성을 고려하지 않을 때 노드의 최대 이동속도에 따른 CD와 CU의 성능은 거의 동일하다. 반면에 전파지연의 비대칭성을 고려할 때 BTB-TDMA의 CD와 CU의 성능은 CR에 영향을 받아 속도가 증가할수록 성능이 저하된다. 따라서, 그림 6 (a)에서 수중노드의 이동속도가 증가할수록 CR이 증가하여 τ_b 를 증가시켜야 하는 것처럼 CD와 CU의 성능을 최대화 하는 $\tau_b(opt)$ 값도 속도가 증가할수록 커진다. 그림 6 (b)-(c)에서 볼 수 있듯이, 노드의 최대 이동속도가 0.5m/s, 2.5m/s, 5m/s일 때, 조건 C에 대한 $\tau_b(opt)$ 의 값은 0.02, 0.05, 0.075로 증가한다.

이처럼 수중노드의 이동속도가 증가할수록 BTB-TDMA의 CD와 CU의 성능을 최대화하기 위해서는 τ_b 의 크기도 증가시켜야 한다.

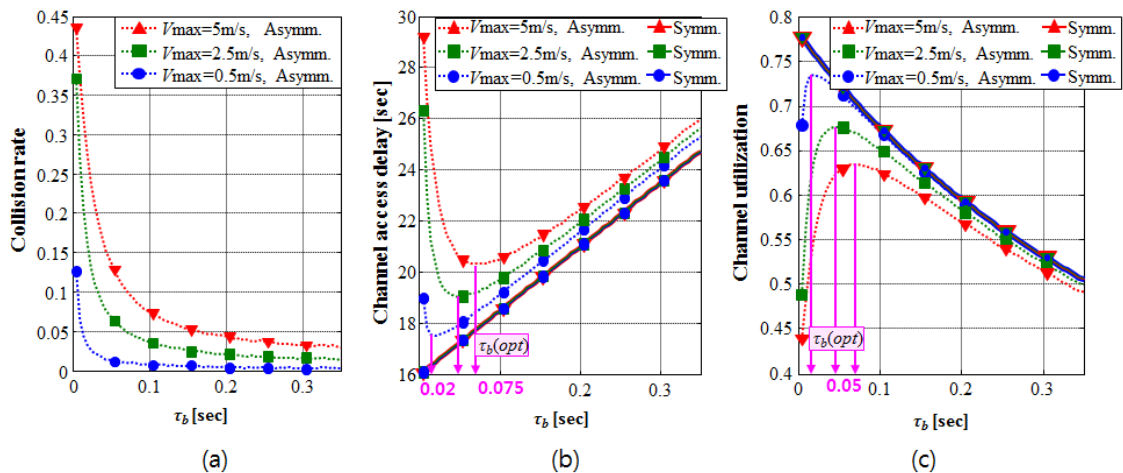


그림 6. 조건 C일 경우, BTB-TDMA 성능 (a) CR ($V_{max}=0.5, 2.5, 5m/s$ 일 때) (b) CD ($V_{max}=0.5, 2.5, 5m/s$ 일 때) (c) CU ($V_{max}=0.5, 2.5, 5m/s$ 일 때)
Fig. 6 The performance of BTB-TDMA for case C (a) CR for $V_{max}=0.5, 2.5, 5m/s$. (b) CD for $V_{max}=0.5, 2.5, 5m/s$. (c) CU for $V_{max}=0.5, 2.5, 5m/s$

V. 결 론

본 논문에서는 수중노드의 전파지연 비대칭성을 고려하여 BTB-TDMA의 성능분석을 수행하였다. 이를 위해 성능 파라미터로 전파지연 비대칭성으로 인해 발생하는 수신 충돌율과 데이터 전송에 성공한 유효 데이터 패킷에 대한 채널접속지연과 채널효율을 정의하였다. 또한, BTB-TDMA 시간슬롯 단위를 결정하는 시간블록의 크기에 따라 BTB-TDMA의 성능을 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 수중노드의 전파지연 비대칭성을 고려할 때와 고려하지 않을 때 BTB-TDMA 성능들을 비교 평가하기 위해, 수중노드의 수, 네트워크 범위, 수중노드의 최대 이동속도에 따라 네트워크 환경을 변화시켜 시뮬레이션을 수행하였다.

전파지연 비대칭성을 고려하지 않았을 때 BTB-TDMA는 비대칭성으로 인한 수신 충돌율은 0이고, 시간블록 길이가 증가함에 따라 채널접속지연과 채널효율 성능은 선형적으로 감소하였다. BTB-TDMA에서 시간블록은 이동노드의 전파지연시간을 분류하고, 시간슬롯의 단위를 결정하게 된다. 따라서 시간블록의 길이가 증가할수록 이동노드의 전파지연시간 분류는 용이하지만 시간슬롯 단위도 증가하여 유휴시간이 커지고 채널접속지연과 채널효율 성능이 저하하게 되는 것이다. 반면에, 전파지연 비대칭성을 고려한 BTB-TDMA는 시간블록 길이가 증가할수록 비대칭성으로 인한 수신 충돌율이 감소하였다. 이는 시간블록의 길이가 증가할수록 시간슬롯의 유휴시간 증가에 따른 보호시간(guard time) 증가로 수신충돌이 감소하게 되는 것이다. 채널접속지연과 채널효율은 시간블록 길이가 증가함에 따라 특정한 시간블록 길이까지는 성능이 증가하였다가 그 이후에는 성능이 감소하였다. 이는 시간블록 길이가 증가함에 따라, 수신 충돌율이 감소하여 채널접속지연과 채널효율성능이 향상되다가 유휴시간 증가에 의한 영향이 커지면서 성능이 저하되는 것이다.

이와 같이, 노드의 전파지연 비대칭성을 고려한 BTB-TDMA에서 수신 충돌율을 최소화하면서 채널접속지연시간과 채널효율을 최대화하는 시간블록 길이는 네트워크 환경에 따라 달라진다. 본 논문에서는 시뮬레이션을 통해 수중노드의 수, 네트워크 범위, 수중노드의 이동속도가 증가할수록 BTB-TDMA의 성능을 최대화하는 시간블록 값도 증가함을 알 수 있었다. 이

는 수중음향네트워크를 위한 시간분할 접속제어 프로토콜의 시간슬롯할당 시 유용한 성능 지표로 사용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원에 의하여 수행된 연구(수중 광역 이동통신 시스템 개발)로서, 관계 부처에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] 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.
- [2] M. Chitre, S. Shahabudeen, and M. Stojanovic, "Underwater acoustic communications and networking: recent advances and future challenges," *Marine Technology Society Journal*, vol. 42, no. 1, pp. 103-116, 2008.
- [3] G. A. car and A. E. Adams. "ACMENet: an underwater acoustic sensor network for real-time environmental monitoring in coastal areas," *IEEE Proc. Radar, Sonar, and Nav.*, vol. 153, no. 4, pp. 365-380, Aug. 2006.
- [4] P. Guo, T. Jiang, G. Zhu, H. H. Chen "Utilizing acoustic propagation delay to design MAC protocols for underwater wireless sensor networks," *Wireless Communications & Mobile Computing*, vol. 8, no.8, pp. 1035-1044, Oct. 2008.
- [5] K. Kredon II, P. Djukic, and P. Mohapatra "STUMP: Exploiting position diversity in the staggered TDMA underwater MAC protocol," *IEEE INFOCOM 2009 proc.*, Apr. 2009.
- [6] S.Y. Shin and S.H. Park, "GT2: Reduced Wastes time Mechanism for Underwater Acoustic Sensor Network," *M. Denko et al. (eds.): EUC Workshops 2007. LNCS*, vol. 4809, Springer, Heidelberg, 2007.
- [7] A. R. Cho, C. H. Yun, J. W. Park, and Y. K. Lim, "Design of a block time bounded TDMA (BTB-TDMA) MAC protocol for UANets," *Ocean Engineering*, vol. 38, no. 17, pp.2215-2226, 2011.

- [8] M. Cardei, "Energy-efficient scheduling and hybrid communication architecture for underwater littoral surveillance," *Comput. Commun. J.* vol. 29, no. 17, pp. 3354-3365, 2006.
- [9] V. Bertram, "Unmanned surface vehicles - A survey," *Skibsteknisk Selskab*, Copenhagen, Denmark, 2008.



조아라 (A-Ra Cho)

2002년 2월 경희대학교 전자공학과 학사
2012년 2월 과학기술연합대학원대학교(UST) 해양정보통신공학과 박사
2012년 ~ 현재 한국해양과학기술원 선박플랜트 연구소(KRISO) 박사후과정
※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 ~ 한국해양과학기술원 선박플랜트 연구소(KRISO) 선임연구원
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