

# 수중 셀룰러 통신 네트워크에서 백홀 자원분배 프로토콜에 관한 연구

윤창호\*, 박종원\*, 최수한<sup>o</sup>

## Backhaul Resource Allocation Protocol for Underwater Cellular Communication Networks

Changho Yun\*, Jong-Won Park\*, Suhan Choi<sup>o</sup>

### 요 약

육상의 셀룰러 네트워크와 같이 수중에서도 기지국을 통해 유입되는 트래픽 양에 따라 적응적으로 기지국의 백홀 자원을 할당하여 전체 네트워크 자원을 효율적으로 관리할 수 있는 수중 셀룰러 통신 네트워크가 필요하다. 본 논문에서는 수중 셀룰러 통신 네트워크에서 기지국에 유입되는 트래픽에 비례하여 기지국의 백홀 자원을 할당하는 자원분배 프로토콜을 제안한다. 자원분배 프로토콜은 자원을 할당하는 주기에 따라 고정주기 방식과 적응주기 방식으로 분류된다. 더 효율적인 자원분배 프로토콜을 결정하기 위해 모의시험을 이용하여 고정주기 방식과 적응주기 방식의 수신율, 메시지 오버헤드, 전송지연 성능을 비교하고 분석하였다. 그 결과, 고정주기 방식이 적응주기 방식에 비해 최대 수백 배 이상의 전송지연이 증가하였으며, 수백 배 이상의 메시지 오버헤드가 더 발생하여 모든 성능 지표에서 적응주기 방식이 고정주기 방식보다 성능이 우수함을 확인하였다.

**Key Words** : Base station, Backhaul, Capacity, Communication, Network, Protocol, Resource allocation, TDMA, Traffic, Underwater

### ABSTRACT

Just like terrestrial cellular networks, underwater cellular communication networks, which can manage the overall network resource by adaptively allocating backhaul resource for each base station according to its ingress traffic, are necessary. In this paper, a new resource allocation protocol is proposed for the underwater cellular communication network, allocating backhaul resource of a base station proportional to its ingress traffic to the base station. This protocol is classified into two types dependent upon allocation period: the resource allocation protocol with adaptive period and that with fixed period. In order to determine a proper resource allocation protocol, the performance of the two protocols, in terms of reception rate, message overhead, and latency is compared and investigated via simulation. As a result, the resource protocol with adaptive period outperforms that with fixed period; the resource allocation protocol with fixed period results in a maximum of  $10^2$  order longer queuing delay as well as  $10^2$  order greater message overhead than that with adaptive period.

※ 본 연구는 해양수산부의 “분산형 수중 관측·제어망 개발 - 수중 통신용 음향채널 및 표준화 연구” 사업(과제번호: D11501016H480000120)의 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

• First Author : Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO), Ocean System Engineering Research Division, sgn0178@kriso.re.kr, 정희원

<sup>o</sup> Corresponding Author : Dan Kook Univ., Department of Mobile System Engineering, suhanc@dankook.ac.kr, 정희원

\* KRISO, Ocean System Engineering Research Division, poetwon@kriso.re.kr, 정희원

논문번호 : KICS2017-01-002, Received January 4, 2017; Revised February 7, 2017; Accepted February 7, 2017

## I. 서 론

오늘날 수중에서도 자원 탐사, 레저, 환경 관측, 군사적 정찰 등 다양한 어플리케이션들이 요구되고 있다<sup>[1,2]</sup>. 대부분의 어플리케이션들은 고정 또는 이동성이 있는 수중 노드들의 협업에 의해 실행되고, 노드들의 제어와 관측한 데이터를 육상으로 전달하기 위해 음파를 이용한 수중 통신 네트워크를 이용한다<sup>[3]</sup>.

대표적인 수중 통신 네트워크는 노드들이 클러스터(Cluster)를 형성하여 클러스터 헤드를 중심으로 채널 접속 및 데이터를 송수신하고, 클러스터 헤드 간 멀티홉 통신을 통해 데이터를 송수신하는 수중 센서 네트워크이다<sup>[4]</sup>. 이 네트워크는 접근이 어려운 열악한 수중 환경에서 해저 광통신 케이블을 이용한 수중 유선 통신 네트워크에 비해 비용을 절감할 수 있고, 설치가 간단하며, 네트워크 확장성이 좋은 장점이 있다. 반면 클러스터 헤드의 제한적인 기능(채널접속제어, 데이터 저장 및 전달 등)때문에 클러스터들에서 불균일한 트래픽이 발생할 때 이를 관리하는 상위의 중앙 제어가 없어, 빈번한 네트워크 실패, 자원의 비효율적 활용, 병목현상(bottleneck)에 의한 전송지연, 버퍼의 용량 초과로 인한 손실을 초래할 수 있다<sup>[5]</sup>. 또한, 클러스터 간 라우팅 정보 전송과 이동에 의한 빈번한 경로 재설정 은 네트워크의 오버헤드를 증가시킨다<sup>[6]</sup>.

이러한 수중 센서 네트워크의 단점을 보완하기 위해, 수중에서도 육상 셀룰러 이동통신 네트워크와 같이, 하나의 셀(Cell) 내에 존재하는 노드들로부터 발생하는 데이터를 셀의 중앙에 위치하는 하나의 기지국에서 처리하는 기지국(Base Station) 기반의 수중 셀룰러 네트워크가 필요하다. 이 셀룰러 네트워크에서는 각 기지국을 수상부이에 원 홉으로 직접 연결하여 통신하므로 수중 센서 네트워크의 클러스터 간 멀티홉 통신에서 발생하는 비효율성을 극복하고, 통신의 신뢰성을 증가시킬 수 있다<sup>[7]</sup>.

특히, 이와 같은 수중 셀룰러 네트워크에서 기지국에서 수상부이로 데이터가 전송되는 백홀(Backhaul) 자원을 기지국에 유입되는 트래픽 양에 따라 적응적으로 할당하면, 제한된 백홀 자원으로 여러 셀의 환경 및 시간에 따라 변화하면서 발생하는 트래픽을 좀 더 효율적으로 처리할 수 있다.

2015년부터 해양수산부의 지원으로 수행 중인 ‘분산형 수중 관측·제어망 개발’ 사업을 통해 수중에서 다양한 어플리케이션을 적용할 수 있는 기지국 기반 수중 셀룰러 통신 네트워크가 개발 중이다. 이 네트워크는 수상부이-기지국-수중 노드들로 구성되어 수상

부이는 기지국들을 관리하고, 기지국들은 자신의 셀 내에 있는 수중 노드들을 관리하는 계층적 네트워크 구조를 가진다.

이 네트워크 구조에서는 셀 내의 노드들로부터 기지국으로 전송되는 상향링크(uplink) 트래픽의 처리가 성능에 큰 영향을 미칠 수 있다<sup>[7]</sup>. 즉, 해당 상향링크 트래픽 양이 기지국의 백홀 용량(capacity)보다 많아지면 기지국 백홀에서 병목현상이 발생할 수 있고, 그 반대의 경우에는 기지국의 백홀 자원이 남아서 충분히 활용되지 못해 전송효율이 떨어질 수 있다<sup>[8]</sup>.

이러한 문제점을 해결하기 위해서는 기지국으로 유입되는 트래픽 양이 기지국의 백홀 용량(capacity)보다 많아지면 기지국은 수상부이로부터 백홀 자원을 더 요청하여 자신의 백홀 용량을 증가시키거나, 수상부이가 주기적으로 기지국의 트래픽 상태를 조사하여 기지국의 백홀 용량을 최신 트래픽 상태에 따라 재조정 등의 자원분배 기술이 필요하다.

본 논문에서는 수중 셀룰러 통신 네트워크에서 기지국에 유입되는 트래픽 양에 비례하도록 수상부이가 기지국의 백홀 용량을 조절함으로써, 하나의 수상부이와 여러 기지국들 사이의 이미 정해진 전체 백홀 자원을 각 기지국으로 효율적으로 분배하고 백홀 전송 효율을 향상시킬 수 있는 자원분배 프로토콜을 제안한다.

이 프로토콜은 각 기지국들에 유입되는 트래픽 양에 따라 수상부이에 의해 주기적으로 기지국의 백홀 용량을 갱신시키거나 (고정주기 방식), 백홀 용량 변경이 필요한 기지국이 수상부이에게 추가적인 자원할당을 요청하여 자신의 백홀 용량을 적응적으로 갱신하는 (적응주기 방식) 두 가지 방법으로 구성된다. 이는 고정적인 트래픽 환경과 실시간으로 랜덤하게 변화하는 트래픽 환경을 모두 고려함으로써 보다 효과적으로 백홀 자원 관리를 수행하기 위함이다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 기지국 기반 수중 셀룰러 통신 네트워크를 설명한다. 3장에서는 제안된 수상부이와 기지국 간의 자원 분배 프로토콜을 설명한다. 4장에서는 다양한 수중 환경에서 모의시험을 통해 제안된 고정주기 방식과 적응주기 방식 자원분배 프로토콜의 성능을 비교 분석하며, 마지막으로 5장 결론에서 본 논문을 마무리한다.

## II. 수중 셀룰러 통신 네트워크

수중 셀룰러 통신 네트워크는 그림 1과 같이 수상부이-기지국-수중 노드로 구성된다. 수상부이는 기지국과 수중 음파 통신을 통해 기지국을 제어하고, 기지

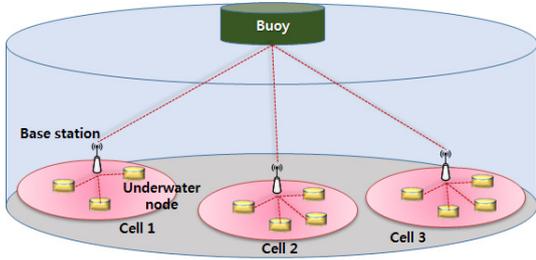


그림 1. 수중 셀룰러 통신 네트워크 구조  
Fig. 1. An architecture of underwater cellular communication networks

국들로 유입되는 트래픽에 따라 기지국의 백홀 자원을 분배하는 기능을 수행한다. 또한, 초단파 대역, 단파대역의 해상 통신 시스템이나 위성통신을 통해 육상으로 연결되어 수중과 육상의 연계를 통해 수중의 데이터를 육상으로 전송한다.

기지국은 자신의 셀에 포함되는 수중 노드들의 채널 접속을 제어하고, 이 노드들로부터 수신한 데이터를 저장하고 처리하며, 처리된 데이터를 백홀을 통해 수상부이로 전달한다. 또한, 수상부이에서 수중노드들로 송신된 데이터를 중계하는 역할을 수행한다. 수중 노드들은 기지국을 중심으로 셀을 형성하여 한 셀에서 고정되거나, 여러 셀들을 이동하며 설정된 어플리케이션에 따라 수중에서 임무를 수행하고 관련 데이터를 생성하여 기지국-수상부이를 통해 육상으로 송신한다.

수중 셀룰러 네트워크는 크게 수상부이-기지국 네트워크와 기지국-수중노드 네트워크의 두 개로 분리될 수 있고, 각각 상향링크(Uplink(UL))와 하향링크(Downlink(DL))를 갖는다.

수상부이-기지국 네트워크에서는 상향링크(기지국에서 수상부이)와 하향링크(수상부이에서 기지국)용으로 다른 주파수를 사용한다. 하향링크는 수상부이가 기지국을 제어하기 위한 제어메시지를 주로 전송하고, 수상부이에 연결된 모든 기지국들에게 브로드캐스팅된다. 상향링크는 수중 기지국들이 수상부이로부터 트래픽양에 비례하는 슬롯의 수를 자원으로 할당받아 시간분할다중접속방식(TDMA: Time Division Multiple Access) 기반으로 서로 송수신 충돌 없이 하나의 주파수 대역을 공유한다. 이때, TDMA를 적용시 시간 동기화가 되었다는 가정에서 자원분배 프로토콜이 수행된다.

하나의 셀을 구성하는 기지국-수중노드 네트워크에서도 상향링크(수중노드에서 기지국), 하향링크(기지국에서 수중노드)용으로 다른 주파수를 각각 적용한

다. 기지국은 매체접속제어 프로토콜에 의해 수중노드들의 채널 접속을 제어하고, 이동성이 있는 수중 노드들은 한 셀에 진입하면 기지국을 통해 네트워크에 진입한다.

### III. 자원분배 프로토콜

이 장에서는 수중 셀룰러 통신 네트워크에서 기지국의 백홀 자원을 효율적으로 사용하기 위한 자원분배 프로토콜을 설명한다. 자원분배 프로토콜은 자원분배를 요청하는 대상에 따라 고정주기 방식과 적응주기 방식으로 나뉜다.

고정주기 방식은 수상부이가 주기적으로 기지국들의 트래픽 상황을 반영하여 자원을 재할당하는 방식이다. 적응주기 방식은 기지국이 자신의 백홀 용량과 유입되는 트래픽 양을 비교하여 트래픽 양이 백홀 용량보다 초과할 때 수상부이로 제어 메시지를 전송하여 자원 재분배를 요청하고, 수상부이는 누적된 트래픽 통계 값을 기반으로 전체 기지국들의 자원을 재조정하는 방식이다.

또한, 자원분배 프로토콜은 자원분배 프로토콜이 실행되는 시점에 따라 초기 과정(Initial Stage; IS)과 정규 과정(Normal Stage; NS)으로 나뉜다. 두 방식 모두 동일한 초기 과정을 통해 수상부이가 기지국들의 초기 자원을 할당하여 기지국의 백홀 용량을 설정한다. 또한, 정규 과정 자원분배 프로토콜은 자원의 재분배가 이루어지는 방식에 따라 고정주기와 적응주기의 두 가지 방식으로 나누어 진다. 자원분배와 관련된 메시지들은 표 1과 같이 정의하였다.

또한, 수상부이와 기지국 간 백홀의 상향링크 자원을 기지국의 트래픽 양에 비례하여 할당하기 위해서 백홀의 상향링크는 그림 2와 같은 주기적인 TDMA 프레임(frame) 구조를 이용한다. 하나의 수상부이에 연결된 각 기지국에게 매 프레임마다 적어도 하나 이상의 슬롯(slot)을 할당하기 위해 한 프레임은 기지국들의 수보다 많은 슬롯으로 구성된다. 그림 2와 같이, 슬롯과 슬롯 사이에는 기지국과 수상부이 간의

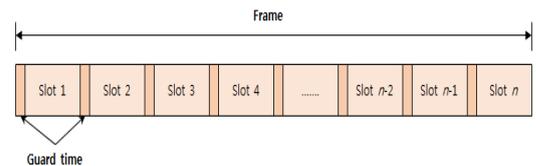


그림 2. TDMA 프레임 구조  
Fig. 2. TDMA frame structure

표 1. 수중 셀룰러 통신 네트워크에서 수상부이와 기지국 간 자원분배 프로토콜 메시지

Table 1. Resource allocation protocol messages between the buoy and the base station in underwater communication networks

| Backhaul resource allocation messages       | Direction           | Stages | Description  | Transmission          |
|---|---------------------|--------|--|-----------------------|
| Periodic_Resource_INFO_Request (PRIREQ)     | Buoy → Base station | IS, NS | A message requesting periodic resource information | Broadcast             |
| Periodic_Resource_INFO_Response (PRIREP)    | Base station → Buoy | IS, NS | A message responding to RAREQ                      | Unicast               |
| Resource_Allocation_INFO_Send (RAIS)        | Buoy → Base station | IS, NS | A message sending resource allocation information  | Broadcast             |
| Resource_Allocation_INFO_Send_ACK (RAISACK) | Base station → Buoy | IS, NS | A message acknowledging RAIS                       | Unicast               |
| Resource_reAllocation_Request (RAREQ)       | Base station → Buoy | NS     | A message requesting resource re-allocation        | Unicast               |
| Resource_reAllocation_ACK (RAACK)           | Buoy → Base station | NS     | A message acknowledging RAREQ                      | Unicast               |
| Downlink_Data (DL_Data)                     | Buoy → Base station | NS     | Downlink Data                                      | Broadcast/<br>Unicast |
| Uplink_Data (UL_Data)                       | Base station → Buoy | NS     | Uplink Data  | Unicast               |

최대 delay spread를 고려하여 guard time을 설정하고, 한 슬롯의 길이는 기지국 백홀의 전송 속도 (transmission rate)를 고려해서 설정한다.

### 3.1 초기 과정

그림 3은 수상부이에서 각 기지국 백홀의 초기 자원을 할당을 통해 백홀의 초기 용량을 설정하는 절차를 나타낸다. 수상부이는 기지국들에게 초기 자원할당

을 위한 PRIREQ를 전송하여 트래픽 정보를 요청한다. 이 때, PRIREQ 메시지는 초기 과정에서 기지국들이 서로 충돌이 없이 PRIREP를 전송할 수 있도록 PRIREP를 송신할 프레임 번호와 각 기지국들의 입시 슬롯 번호의 정보들을 포함한다. PRIREQ를 수신한 기지국들은 자신들의 현재 트래픽 정보(현재 트래픽, 누적 평균 트래픽, 최대 트래픽 등)를 포함한 PRIREP를 생성하여 송신한다. 수상부이는 한 프레임 동안 대기하여 셀 내의 모든 기지국들로부터 PRIREP를 수신하지 못할 경우, 다시 PRIREQ를 전송하고, PRIREP를 이미 전송한 기지국들도 새로운 PRIREQ를 수신한 경우 업데이트된 트래픽 정보를 포함한 PRIREP를 전송한다.

모든 기지국들로부터 PRIREP를 수신한 수상부이는 자원할당 알고리즘을 수행하고, 그 결과인 기지국별 백홀 용량 정보를 RAIS를 통해 각 기지국에 전송하고 한 프레임을 대기한다. 이 때, RAIS 메시지는 고정 주기 방식일 경우 기지국별 할당 슬롯 번호와 기지국들이 주기를 유추할 수 있도록 시작 프레임 번호, 종료 프레임 번호의 정보들을 포함한다. 적응 주기 방식인 경우 기지국이 스스로 자원 재할당을 요청하므로 RAIS 메시지는 기지국별 할당 슬롯 번호와 시작 프레임 번호의 정보들만 포함한다. RAIS를 수신한 기지국들은 각각 자신의 초기 백홀 용량을 설정하고, 수상부이에게 RAISACK를 송신한다.

수상부이가 한 프레임 동안 대기하여 셀 내의 모든 기지국들로부터 RAISACK를 수신하지 못할 경우, 백

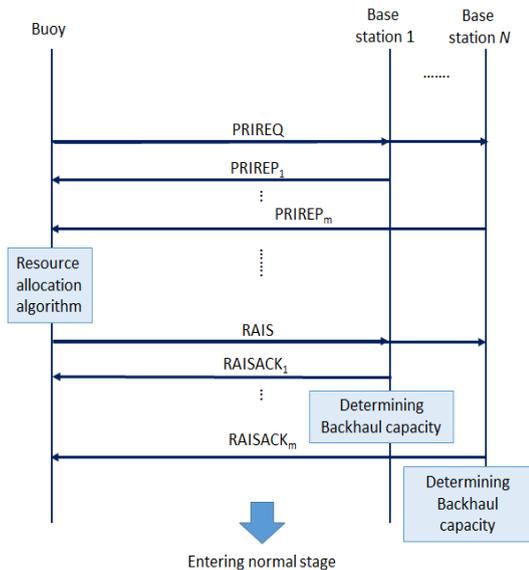


그림 3. 자원분배 프로토콜의 초기 과정  
Fig. 3. Initial Stage of resource allocation protocol

홀 용량 정보를 재수정하여 RAIS를 재송신하며, RAISACK를 이미 전송한 기지국들도 RAIS를 재수신한 경우 RAISACK를 재전송한다.

셀 내의 모든 기지국들로부터 RAISACK를 수신한 수상부이는 DL\_Data를 송신하며 정규 과정으로 진입하고, 이 DL\_Data를 수신한 기지국도 자신이 할당 받은 상향링크 슬롯에 UL\_Data를 전송하며 정규 과정으로 진입하여 초기 과정을 종료한다.

### 3.2 고정주기 방식의 정규 과정

고정주기 방식의 정규 과정은 특정한 주기( $T$ )에 따라 초기 과정을 반복적으로 수행한다. 그림 4와 같이 수상부이가 기지국들에게 미리 설정된 주기에 따라 자원할당을 위한 PRIREQ를 전송하여 트래픽 정보를 요청한다. 이 PRIREQ를 수신한 기지국들은 자신들의 현재 트래픽 정보를 PRIREP를 생성하여 송신한다.

모든 기지국들로부터 PRIREP를 수신한 수상부이는 자원할당 알고리즘을 수행하여 각 기지국의 백홀 용량을 재설정하고, 기지국 각각의 자원할당 정보를 RAIS를 통해 전송한다. RAIS를 수신한 기지국들은 각각 자신의 백홀 용량을 새로 받은 값으로 설정하고, 수상부이에게 RAISACK를 송신한다.

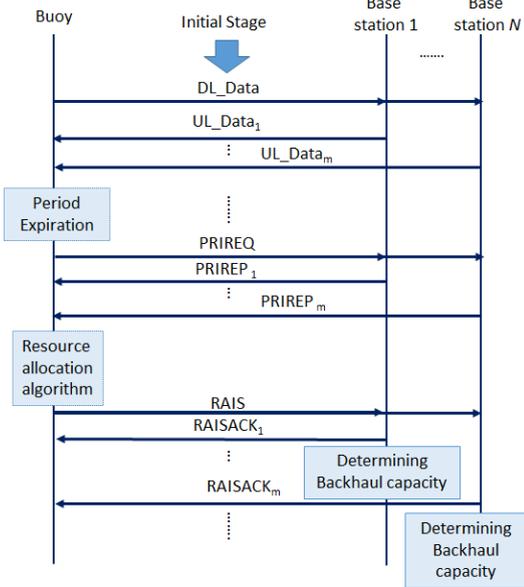


그림 4. 자원분배 프로토콜의 정규 과정 (고정주기 방식)  
Fig. 4. Normal Stage of resource allocation protocol with fixed period

### 3.3 적응주기 방식의 정규과정

적응주기 방식에서는 기지국이 자신의 재할당 주기에 따라 자신의 트래픽을 모니터링하여 백홀 용량이 부족할 때 수상부이로부터 백홀 용량의 재조정을 요청한다. 이때, 재할당 주기 값은 기지국이 다음 자원 재할당 요청 여부를 판단하는 시점까지 기다리는 시간이며, 다음 재할당 주기 값은 재설정 시점에서의 누적 트래픽 값에 따라 현재 재할당 주기 값에서 증가 또는 감소를 시키며, 그 설정 방법은 아래와 같다.

자원 재할당 주기는 각 기지국의 백홀 용량 및 요구되는 트래픽에 따라서 적응적으로 변화된다.

현재 트래픽과 비교하여 기지국의 백홀 용량이 초과되거나 부족한 경우, 재할당 주기를 지수 함수적(exponential) 형태로 증가 또는 감소시킨다. 따라서 재할당 주기 값을  $T = (T_{init})^m (T_{init} \geq 2, m \geq 0)$ 으로 나타나며,  $T_{init}$ 은 초기 재할당 주기 값이다.

기지국의 백홀 용량이 트래픽 양을 초과하는 경우에는 빈번한 재할당으로 인한 오버헤드를 줄이기 위해 재할당 주기를 지수적으로 증가시킨다. 즉,  $m$ 의 값을 1 증가시킨다.

기지국의 백홀 용량이 트래픽 양보다 부족한 경우에는 부족한 백홀 용량을 빠르게 증가시키기 위해서 재할당 주기를 감소시킨다. 따라서,  $m \geq 1$ 인 경우  $m$ 의 값을 1 감소시킨다.

적응주기 방식의 정규 과정에서는 그림 5와 같은 기지국에서 자신의 자원할당 주기가 종료된 후, 자원할당 재조정이 필요하면(즉, 백홀 용량 < 현재 트래픽 양), 현재 백홀 용량과 트래픽 정보를 포함한 RAREQ를 수상부이에게 전송하고 한 프레임을 대기한다. 만약, 한 프레임 동안 수상부이로부터 RAACK를 수신하지 못하면, 다음 프레임에서 RAREQ를 재전송하고 대기한다. 수상부이는 RAACK를 해당 기지국에 전송하고, RAREQ를 기반으로 자원할당 알고리즘을 수행하고 그 결과를 RAIS로 각 기지국에 알려준다.

이 과정에서 RAACK를 수신한 기지국은 UL\_Data를 전송하면서 RAIS를 수신 대기하고, RAIS를 수신하면 새로운 백홀 용량을 설정하고 정규 과정을 수행한다. 이때, 네트워크 내의 자원할당 재조정을 요청하지 않았던 나머지 기지국들은 RAIS를 수신하여 백홀 용량이 새로 설정되어도 자신의 재할당 주기를 수정하지 않고, 재할당 주기가 만료되면 현재 누적 트래픽 값에 따라 유지, 증가 또는 감소시킨다.

수상부이는 특정 기지국으로부터 RAREQ를 수신하면 그 프레임동안 다른 기지국들로부터 RAREQ가

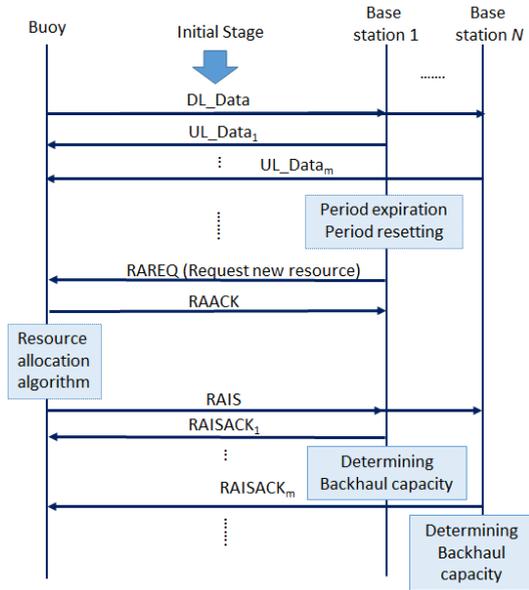


그림 5. 자원분배 프로토콜의 정규 과정 (적응주기 방식)  
Fig. 5. Normal Stage of resource allocation protocol with adaptive period

전송되는지 대기한다. 만약 적어도 하나 이상의 기지국으로부터 RAREQ를 수신하면 그 기지국들에게 RAACK를 전송하고, 자원할당 알고리즘을 다시 수행해서 다음 프레임에 RAIS를 전송한다.

RAIS를 송신한 이후의 처리과정은 초기 과정과 동일하다. 즉, 수상부이가 특정 기지국의 요청에 의해 자원할당 알고리즘을 수행 시 참고하기 위해, 기지국들은 UL\_Data를 전송할 때, PRIREQ에서와 같이 자

표 2. 자원할당 알고리즘 파라미터  
Table 2. Parameters for resource allocation algorithm

| Parameters           | Definition  |
|----------------------|---|
| $N$                  | The number of base stations   |
| $n$                  | The number of slots per frame ( $n > N$ )   |
| $i$                  | An index of a station ( $1 \leq i \leq N$ )   |
| $T$                  | Resource allocation update period (unit: frame)   |
| $k$                  | An index of a frame ( $k = 1, 2, 3, \dots$ )  |
| $TR_{Qi}(k)$         | Queued traffic in the queue $i$ at the $k$ th frame   |
| $TR_{INi}(k)$        | Generated traffic of $i$ at the $k$ th frame  |
| $TR_i(k)$            | The traffic of $i$ at the $k$ th frame, $TR_i(k) = TR_{Qi}(k) + TR_{INi}(k)$                                      |
| $TR_{Ai}(k)$         | The average of traffic of $i$ at the $k$ th frame, $TR_{Ai}(k) = \left[ \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k TR_i(j) \right]$ |
| $C_i$                | Backhaul capacity of $i$ (= allocated slots)  |
| $\Delta C_i$         | Additional backhaul capacity of $i$ proportional to the traffic   |
| $\tilde{\Delta C}_i$ | An integer value of $\Delta C_i$  |
| $D_i$                | The difference between $\Delta C_i$ and $\tilde{\Delta C}_i$  |

신의 트래픽 정보를 데이터와 함께 전송한다.

### 3.4 자원할당 알고리즘

이 장에서는 수상부이에서 각 기지국으로부터 수집된 트래픽 정보를 이용하여 각 기지국이 UL\_Data 전송에 사용할 백홀 자원을 할당하는 구체적인 알고리즘에 대해서 설명한다. 표 2는 자원할당에 사용되는 파라미터들을 정의하였다.

자원을 할당하는 방법은 한 프레임마다 기지국은 적어도 하나의 슬롯을 기본적으로 할당하고, 나머지  $(n - N)$  개의 슬롯들은 각 기지국의 트래픽 양에 비례하도록  $\Delta C_i$ 만큼의 슬롯을 기지국들에게 각각 추가 분배하는 것이다.  $k$ 번째 프레임에서 자원 재할당이 이루어질 때, 한 기지국  $i$ 에 할당되는 백홀 용량  $C_i$ 는  $1 + \Delta C_i$ 이며,  $\Delta C_i$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$\Delta C_i = (n - N) \times \frac{TR_{Ai}(k)}{\sum_{i=1}^N TR_{Ai}(k)} \quad (1)$$

수식 (1)의  $\Delta C_i$ 의 값은 실수 형태로 나타난다. 추가로 할당되는 슬롯 수는 정수이어야 하므로, 각 기지국의  $\Delta C_i$ 을 반올림한 값인  $\tilde{\Delta C}_i$ 을 고려한다. 만약  $\sum_{i=1}^N \tilde{\Delta C}_i = n - N$  이면, 남은  $(n - N)$  개의 슬롯이 각 기지국이 필요로 하는 분량만큼 비율적으로 할당

이 잘 되었으므로, 최종적으로 기지국  $i$ 에  $(1 + \Delta \tilde{C}_i)$ 개의 슬롯을 할당할 수 있다. 만약  $\sum_{i=1}^N \Delta \tilde{C}_i \neq n - N$ 이면, 슬롯이 초과 할당되었거나( $\sum_{i=1}^N \Delta \tilde{C}_i > n - N$ ), 슬롯이 덜 할당될 수 있어( $\sum_{i=1}^N \Delta \tilde{C}_i < n - N$ ) 이를 보상하는 과정이 필요하다.

슬롯이 초과 할당된 경우, 기지국들에게 할당된 전체 슬롯의 수가  $\sum_{i=1}^N \Delta \tilde{C}_i - (n - N)$ 만큼 초과로 할당된 상태이므로, 자원할당에서 가장 이득을 많이 본 기지국의 순위를 결정하고, 처음부터  $\sum_{i=1}^N \Delta \tilde{C}_i - (n - N)$ 만큼의 기지국으로부터 이미 할당된  $\Delta \tilde{C}_i$ 에서 하나씩 감소시킨다. 이를 위해, 모든 기지국들에 대해  $D_i = \Delta C_i - \Delta \tilde{C}_i$  값을 각각 계산한다. 여기서  $D_i$ 의 값이 작을수록 이득을 많이 본 것이다.  $D_i$ 의 값이 작은 순서로 전체  $N$ 개의 기지국 중에서  $\sum_{i=1}^N \Delta \tilde{C}_i - (n - N)$ 개만큼 기지국을 선택하고 해당 기지국들에게 이미 할당된  $\Delta \tilde{C}_i + 1$ 에서 슬롯을 1개씩 감소시킨다. 만약 동일한  $D_i$  값을 가지는 다수의 기지국들 중 슬롯을 감소시켜야할 경우 랜덤하게 한 기지국을 선택한다.

슬롯이 덜 할당된 경우, 기지국들에게 할당된 전체 슬롯의 수가  $(n - N) - \sum_{i=1}^N \Delta \tilde{C}_i$ 만큼 덜 할당된 상태이므로, 자원할당에서 가장 손해를 많이 본 기지국의 순위를 결정하고, 처음부터  $(n - N) - \sum_{i=1}^N \Delta \tilde{C}_i$ 수만큼의 기지국으로부터 이미 할당된  $\Delta \tilde{C}_i$ 에서 하나씩 추가시킨다. 이를 위해, 모든 기지국들에 대해  $D_i = \Delta C_i - \Delta \tilde{C}_i$  값을 각각 계산한다. 여기서  $D_i$ 의 값이 클수록 손해를 많이 본 것이다.  $D_i$ 의 값이 큰 기지국부터 내림차순으로 정렬한 후,  $(n - N) - \sum_{i=1}^N \Delta \tilde{C}_i$ 개만큼 선택하고, 해당 기지국

들에게 이미 할당된  $\Delta \tilde{C}_i + 1$ 에서 슬롯을 1개 증가시킨다. 만약 동일한  $D_i$  값을 가지는 다수의 기지국들 중 슬롯을 증가시켜야할 경우 랜덤하게 한 기지국을 선택한다.

#### IV. 모의시험 조건 및 결과

본 논문에서 제안한 수중 셀룰러 통신 네트워크에서 사용될 수 있는 백홀 자원분배 프로토콜의 성능을 검증하기 위해 네트워크 레벨에서 랜덤 트래픽을 생성하여 자원할당 프로토콜 메시지 및 데이터를 송수신하는 모의시험을 아래의 가정들을 고려하여 수행하였다.

수중 채널환경에서의 전송 에러와 시간 동기 에러가 없이 수상부이와 기지국들 사이에는 데이터 및 자원분배 프로토콜 메시지가 손실없이 전송된다.

기지국들은 무한대의 큐 길이(infinite queue length)를 가지는 버퍼가 있어 기지국들로 유입되는 모든 패킷들은 패킷 드롭(drop)없이 모두 전송된다. 이것을 Guaranteed Link Capacity(GLC) 환경이라고 부르기로 한다.

또한, 모의시험은 표 3과 같은 조건에서 수행되었고, 자원할당 프로토콜에서 제안된 두 가지의 자원할당 주기 (즉, 고정주기와 적응주기) 설정 방법을 적용했을 때 수신율, 메시지 오버헤드, 전송지연 성능을 아래와 같이 분석한다. UL\_Data 전송 시 적응주기 방식은 고정주기 방식에 비해 트래픽 정보를 보내기 위하여 10%의 슬롯 리소스를 사용하는 조건으로 (즉, 고정주기 방식은 한 슬롯에 10kbits 데이터 전송, 적응주기 방식은 한 슬롯에 9kbits 데이터, 1kbits 트래픽

표 3. 모의시험 조건  
Table 3. Simulation conditions

| Parameters                    | Values  |
|-------------------------------|---|
| Simulation time               | 1000 frames   |
| Data rate                     | 10 kbps   |
| Data length                   | 10 kbits  |
| The number of base stations   | 10  |
| The number of slots per frame | 100   |
| Generated traffic per frame   | uniform random<br>Min. value: 10 kbits<br>Max. value: 10:10:100 kbits |
| $T$ of fixed period           | 8, 32, 128, 256   |
| $T_{init}$ of adaptive period | 8   |

정보 전송) 모의시험을 수행하였다. 모의시험은 총 20 회를 수행하였으며, 모의시험 결과는 신뢰구간 95%를 만족한다.

### 4.1 수신율

수신율은 모의시험 동안 기지국들에서 생성된 데이터가 수상부이로 전송되었는지를 확인하는 성능 파라미터이며, 고려된 GLC 가정을 충족하는지 확인할 수 있다. 그림 6에서 보듯이, 주어진 모의시험 조건은 고정주기 방식과 적응주기 방식에서 기지국들로부터 수신된 대부분의 데이터가 모의시험 동안 수상부이로 수신되어 (즉, 수신율이 대부분 1에 근접하고 최소가 0.990임) GLC를 대체로 만족함을 확인하였다.

또한, 적응주기 방식이 고정주기 방식에 비해 근소하게 수신율이 높았으며, 최대 수신율 차이는 트래픽 최댓값이 100 kbps일 때, 0.008이다. 고정주기 방식에서 자원할당 업데이트 주기( $T$ )와 트래픽 최댓값이 증가할수록 수신율 하락하는 것은 생성된 트래픽이 큐에 누적이 되면서 모의시험 시간동안 수상부이로 모두 송신이 되지 않았기 때문이다.

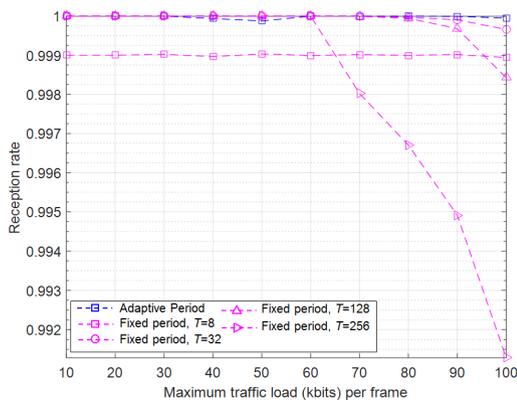


그림 6. 고정주기 및 적응주기 방식의 수신율  
Fig. 6. Reception rate of resource allocation protocol with fixed/adaptive period

### 4.2 메시지 오버헤드

그림 7에서 보듯이, 고정주기 방식은 트래픽과 무관하게 일정한 주기가 지나면 수상부이에서 자원 재할당이 이루어지고, 이때 트래픽 값은 수상부이에서 자원인 슬롯을 할당하는 지표로만 적용된다. 따라서, 메시지 오버헤드는 전송 주기인  $T$ 에 의해서만 증가 또는 감소한다. 즉,  $T$ 가 작을수록 자원 재할당이 빈번해지므로 메시지 오버헤드가 증가하고 반대로  $T$ 가 클수록 메시지 오버헤드가 감소한다.

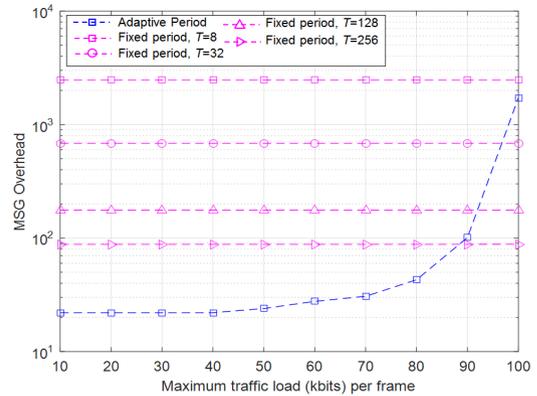


그림 7. 고정주기 및 적응주기 방식의 메시지 오버헤드  
Fig. 7. Message overhead of resource allocation protocol with fixed/adaptive period

반면, 적응주기 방식은 트래픽 최댓값이 증가함에 메시지 오버헤드가 증가한다. 트래픽 최댓값이 크면 프레임당 수상부이로 유입되는 트래픽의 변화량이 증가하여 기지국의 백홀 용량을 초과하는 트래픽이 발생할 확률이 증가하여, 정규 과정 (NS)에서 자원 재조정을 빈번하게 요청하게 되어 메시지 오버헤드가 상승하기 때문이다.

두 방식의 메시지 오버헤드를 비교할 때, 프레임당 트래픽 최댓값이 90kbps 미만일 때, 적응주기 방식이 고정주기 방식에 비해 메시지 오버헤드를 크게 줄일 수 있으며, 특히  $T$ 가 작을수록 그 격차가 커짐을 알 수 있다 (최대 10<sup>2</sup> 오더만큼 메시지 오버헤드가 증가함). 프레임 당 트래픽 최댓값이 90kbps 이상인 경우도, 적응주기 방식이 고정주기 방식에 비해 메시지 오버헤드 성능이 열화하지 않음을 확인할 수 있다. 또한, 이 결과를 통해 업링크 트래픽인 UL\_Data에 트래픽 정보를 추가하여 보내어 슬롯 자원(resource)을 사용하여도, 기지국이 적응적으로 재할당 주기를 조절하는 것이 메시지 오버헤드를 줄일 수 있음을 확인하였다.

### 4.3 전송 지연

그림 8에서 보듯이, 기지국의 프레임 당 트래픽 최댓값이 증가함에 따라 고정주기 방식과 적응주기 방식 모두 전송 지연이 증가한다. 이는 트래픽 최댓값이 증가할수록 백홀 용량보다 한 프레임에서 처리해야 하는 트래픽이 초과하여 큐에 머무는 시간이 그만큼 늘어나기 때문이다.

고정주기 방식에서  $T$ 값과 ( $T=128, 256$ ) 트래픽 최댓값이 증가할수록 ( $\geq 70$  kbps) 전송지연이 10<sup>3</sup> 오더 이상이 되지만, 적응주기 방식은 유입되는 트래

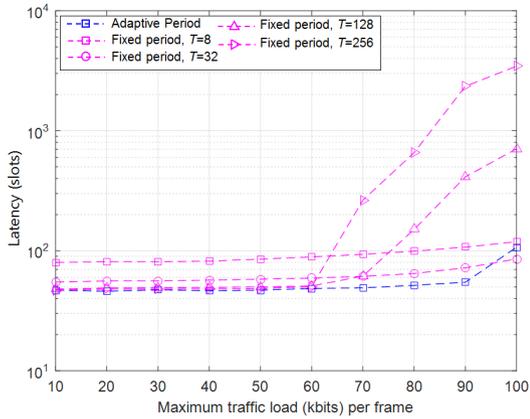


그림 8. 고정주기 및 적응주기 방식의 전송지연  
Fig. 8. Queuing delay of resource allocation protocol with fixed/adaptive period

픽과 백홀 용량을 비교하여 적응적으로 자원 재조정 요청을 하여 트래픽 최대값이 증가하여도 전송지연의 변화량이 크지 않음을 확인하였다 ( $10^2$  이하). 프레임 당 트래픽 최대값이 90kbits 이하일 때, 적응주기 방식이 고정주기 방식에 비해 전송지연이 항상 낮으며, 특히  $T$ 가 클수록 그 격차가 커짐을 알 수 있다 (최대  $10^2$  오더만큼 메시지 오버헤드가 증가함). 또한, 프레임 당 트래픽 최대값이 100kbits인 경우에도, 적응주기 방식이 고정주기 방식에 비해 메시지  $T$  값이 32인 경우를 제외하고 적응주기 방식의 전송지연 성능이 우수하였다.

## V. 결론

본 논문에서는 수상부이-기지국-수중노드로 구성된 수중 셀룰러 통신 네트워크에서 기지국과 수상부이 간의 백홀 자원분배 프로토콜을 제안하였다. 제안된 자원분배 프로토콜은 기지국에 유입되는 트래픽의 양을 고려하여 기지국의 백홀 용량을 결정하기 위한 제어 메시지 정의, 초기 과정과 정규 과정으로 구성되는 처리 절차, 구체적인 자원 할당 알고리즘을 포함한다. 또한, 이 프로토콜은 자원을 재할당하는 주기에 따라 고정주기 방식과 적응주기 방식으로 나뉜다.

제안한 프로토콜의 성능을 검증하기 위해서 수중 셀룰러 네트워크 환경을 고려하여 모의시험을 수행하였고, 모의시험을 통해 수신율, 메시지 오버헤드, 전송지연 측면에서 고정주기 방식과 적응주기 방식의 자원분배 프로토콜의 성능을 비교 및 분석하였다.

모의시험 결과, 모든 성능 지표에서 적응주기 방식

이 고정주기 방식보다 우수하였다. 특히, 트래픽의 변화량이 심할수록 적응주기 방식의 성능의 변화는 크지 않으나, 고정주기 방식은 큰 성능 열화를 나타냈다. 따라서, 트래픽이 변화가 많은 수중 셀룰러 네트워크의 경우 적응주기 방식의 자원분배 프로토콜을 적용하여 네트워크의 효율을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

## References

- [1] M. Stojanovic and L. Freitag, "Recent trends in underwater acoustic communications," *J. Marine Tech. Soc.*, vol. 47, no. 5, pp. 45-50, Oct. 2013.
- [2] Z. Jiang, "Underwater acoustic networks-Issues and solutions," *Int. J. Intell. Control and Syst.*, vol. 13, no. 3, pp. 152-161, 2008.
- [3] 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, pp. 1-14, 2016.
- [4] M. Chitre, S. Shahabudeen, and M. Stojanovic, "Underwater acoustic communications and networking: recent advances and future challenges," *J. Marine Technol. Soc.*, vol. 42, no. 1, pp. 103-116, 2008.
- [5] J. H. Kim, T. H. Im, K. Y. Kim, and H. L. Ko, "A study on the underwater base station based underwater acoustic communication systems," in *Proc. KICS Int. Conf. Commun.*, pp. 353-354, Jun. 2015.
- [6] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "Underwater acoustic sensor networks: research and challenges," *J. Ad-hoc Networks*, vol. 3, pp. 257-279, 2005.
- [7] M. Stojanovic, "Design and capacity analysis of cellular-type underwater acoustic communications," *J. Oceanic Eng.*, vol. 33, no. 2, pp. 171-181, Apr. 2008.
- [8] H. Raza, "A brief survey of radio access network backhaul evolution: part I," *Commun. Mag.*, vol. 49, no. 6, pp. 164-171, Jun. 2011.

**윤 창 호 (Changho Yun)**



1999년 2월 : 창원대학교 전자공학과 공학사  
2004년 2월 : 광주과학기술원 정보통신공학과 공학석사  
2007년 2월 : 광주과학기술원 정보통신공학과 공학박사  
2007년~2008년 : North Carolina State Univ. 박사후연구원

2008년~현재 : 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 책임연구원

2009년 3월~2015년 2월 : 과학기술연합대학원대학교 해양정보통신공학과 겸임교원(부교수)

2015년 3월~현재 : 과학기술연합대학원대학교 해양시스템공학과 겸임교원(부교수)

<관심분야> 해상 및 수중 네트워크 개발

**최 수 한 (Suhan Choi)**



1994년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과 공학사  
1996년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과 공학석사  
2006년 8월 : Univ. of Michigan, Ann Arbor 공학박사  
1996년 2월~1996년 12월 : 삼성종합기술원 주임연구원

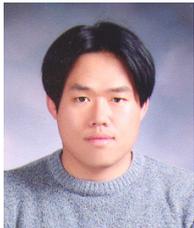
1997년 1월~2010년 8월 : 삼성전자 책임연구원

2010년 9월~2016년 8월 : 단국대학교 모바일시스템공학과 조교수

2016년 9월~현재 : 단국대학교 모바일시스템공학과 부교수

<관심분야> 통신이론, 정보이론, 무선통신, 이동통신시스템, 해상 및 수중 네트워크

**박 종 원 (Jong-Won Park)**



1995년 2월 : 아주대학교 전자공학과 공학사  
1997년 2월 : 아주대학교 전자공학과 공학석사  
2006년 2월 : 아주대학교 전자공학과 공학박사  
1997년~현재 : 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 책임연구원

2006년 3월~현재 : 과학기술연합대학원대학교 해양시스템공학과 전임교원(교수)

<관심분야> 수중 및 해상통신 기술, 항만보안검색 시스템 기술, 선박 항해 및 자동화 기술