

다중 홉 해양통신망에서 실시간 통합 서비스를 위한 MAC 프로토콜

조 구 민[°], 윤 창 호^{**}, 임 용 곤^{**}, 강 충 구^{*}

A MAC Protocol for Integrated Service in the Multi-Hop Ad-Hoc Maritime Communication Network

Kumin Cho[°], Changho Yun^{**}, Yong-Kon Lim^{**}, Chung G. Kang^{*}

요 약

본 논문은 Self-Organizing Time Division Multiple Access (SO-TDMA) 기반의 MAC 프로토콜을 사용하는 다중-홉 해양통신망에서 비실시간 서비스뿐만 아니라 중단간 지연시간 품질을 보장해야 하는 실시간 서비스를 통합적으로 지원하기 위한 새로운 프레임 구조를 제안하고, 실시간 트래픽의 부하에 따라 적응적으로 자원을 분배하는 방안을 제시한다. 실시간 사용자의 평균 불능 성능을 보장하기 위한 자원 할당을 통해 동적으로 프레임 구조를 제어하는 방안을 제시한다. 한편, 이를 위한 평균 불능 확률을 수학적으로 분석하고, 이에 따라 결정된 프레임 구조에 대해서 실시간 서비스의 품질을 시뮬레이션을 통해 검증한다.

Key Words : VHF maritime communication, ad hoc network, self-organizing-TDMA (SO-TDMA), MAC protocol, Real-time service

ABSTRACT

In this paper, we propose a new frame structure and the underlying dynamic resource control mechanism to support an integrated service, including a real-time (RT) service that requires to serve the end-to-end delay performance, as well as non-real-time (NRT) service, using Self-Organizing Time Division Multiple Access (SO-TDMA)-based MAC protocol in a multi-hop ad-hoc maritime communication network. The underlying frame structure is dynamically configured by resource allocation to guarantee the average target outage performance of the real-time service. Toward this end, we analyze the average outage probability and its performance is verified for the proposed frame structure by simulation.

I. 서 론

해양통신망을 이용한 데이터 통신의 수요가 증가함에 따라 해양통신용 VHF 대역에서 데이터 전송률을 증대하기 위한 새로운 해양통신 시스템에 대

한 연구가 진행되고 있다. ITU-R에서는 ITU-R M.1842-1 권고문을 통해 데이터 통신을 위한 새로운 VHF대역 통신시스템은 해상 안전을 위해 선박간 위치정보를 공유하고 단문의 메시지를 송수신하는 AIS (Automatic Identification System)와 호환성을

※ 본 연구결과는 국토해양부의 “기반 해운 물류 체계 구축을 위한 기반기술 연구” 과제에서 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

♦ 주저자 겸 교신저자 : 고려대학교 전기전자전파공학부 무선정보시스템공학 연구실, kumin84@korea.ac.kr, 학생회원

* 고려대학교 전기전자전파공학부, ccgkang@korea.ac.kr, 중신회원

** 한국해양과학기술원, sgn0178@kiost.ac, yklim@kiost.ac, 정회원

논문번호 : KICS2013-06-269, 접수일자 : 2013년 6월 28일, 최종논문접수일자 : 2013년 7월 22일

유지하도록 권고하였고, 시스템의 수율을 향상시키기 위한 PHY 및 MAC 계층에 대한 다양한 예시를 제시하였다¹¹. 예를 들어, PHY 계층에서는 25kHz의 대역폭으로 정의된 해양통신용 VHF 채널에 대해 최대 4개의 인접한 채널을 하나로 통합하여 100kHz의 대역폭을 가질 수 있으며, MAC 계층에서는 해양 통신망에서 셀룰러 망과 같이 VHF 채널 자원을 공간적으로 재사용할 수 있음을 보였다.

해양통신망에서 원활한 데이터 통신이 이루어지기 위해서는 정보를 송수신하는 선박간 또는 선박과 육상기지국간에 연결성이 보장되어야 한다. 하지만 VHF 대역에서 실제 커버리지는 약 30km 내외로, 단일-홉 통신으로는 넓은 해상에 분포되어 있는 각 선박의 연결성을 보장하기 어렵다¹². 따라서, 전송거리를 확장하기 위한 선박간 애드혹 네트워크(Ship Ad-hoc NETwork: SANET)에 대한 연구가 진행되고 있으며, SANET에서는 기존 통신시스템과의 호환성을 유지하기 위해 AIS에서 사용되는 MAC 프로토콜인 SO-TDMA (Self Organizing TDMA: SO-TDMA)를 다중-홉 데이터 통신이 가능하도록 변형하여 애드혹 자율 구성 TDMA (ad-hoc self-organizing-TDMA: ASO-TDMA) 방식의 MAC 프로토콜을 제시하였다¹³. ASO-TDMA에서 각 선박은 자신의 위치를 기준으로 육상 기지국과의 거리를 계산하고, 해당 거리를 VHF 대역 커버리지로 나누어 육상 기지국에 도달하기 위한 홉 수를 계산한다. 육상기지국에 대한 자신의 상대적 위치인 홉 수를 이용하여 ASO-TDMA 프레임에서 자신이 사용할 자원의 위치를 파악한 후에 자신과 동일한 홉 영역에 존재하는 선박들과 경쟁방식을 이용하여 데이터를 전송한다^{14,15}.

기존 ASO-TDMA에서는 선박들은 자신의 물리적 위치에 따라 정해진 자원을 사용하는 방식을 사용하였기 때문에, 각 홉 영역 간 부하 균형을 위한 적절한 자원분배 방법 및 홉 영역별 수율최적화 방법에 대한 연구가 진행되었다¹⁶. 그러나 60초 길이를 갖는 ASO-TDMA 프레임 구조는 종단간의 지연시간이 크기 때문에 실시간 서비스를 지원하는 것이 불가능하며, ASO-TDMA의 자원 공유방식은 분산적인 경쟁을 통해 자원을 획득하는 방식이기 때문에 실시간 사용자에게 필요한 만큼의 전송속도를 보장하지 못한다. 따라서, 본 논문에서는 실시간 사용자들이 원하는 수준의 종단간 지연시간과 전송률을 보장할 수 있도록 실시간 및 비실시간 자원 영역을 분리함으로써 실시간 사용자가 원하는 서비스

품질을 보장할 수 있는 새로운 형태의 프레임 구조를 제안한다. 이때, 실시간 및 비실시간 사용자들에게 할당하는 자원의 양에 따라 전체 시스템 수율이 달라지기 때문에 적절한 자원할당이 함께 고려되어야 하며, 본 논문에서는 실시간 사용자에게 대한 전송률 확보를 기준으로 실시간 자원의 양을 동적으로 제어하는 방법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기존 SO-TDMA와 ASO-TDMA 방식의 시스템 모델과 그 문제점에 대해 설명하고, 3장에서는 2장에서 논의된 문제점을 해결하기 위해 새롭게 제시된 MAC 프레임 구조를 설명한다. 4장에서는 제안된 프레임 구조에서 시스템 수율 성능을 개선하기 위한 방법을 제안하고, 5장에서 시뮬레이션을 통해 적응적 프레임 구조의 성능을 확인한 후에 6장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 배경 설명

2.1. AIS를 지원하기 위한 SO-TDMA 프로토콜

AIS에서는 1분을 기본 단위로 하는 프레임을 정의하며, 하나의 프레임은 2,250개의 시분할 슬롯으로 구성된다. AIS 선박들은 각 프레임 내에 존재하는 빈 슬롯들을 탐색하여 전송의 목적에 따라 서로 다른 4개의 MAC 프로토콜(Random Access TDMA, Incremental TDMA, Fixed Access TDMA, Self-organizing TDMA) 중에서 하나를 선택하여 정보를 전송하며, 각 프로토콜은 기본적으로 분산 경쟁방식을 통해 슬롯을 획득한다¹⁷.

SO-TDMA는 선박이 주기적으로 자신의 위치 및 항행 정보를 주변에 알릴 때 사용되는 MAC 프로토콜로서, 주기적으로 발생하는 트래픽의 특성 때문에 한 번의 경쟁에 의해 획득한 슬롯은 여러 프레임에 걸쳐 경쟁 없이 사용이 가능하도록 설계되었다. 이러한 예약 기능이 가능하도록 하기 위해 네트워크에 처음 진입하는 선박은 전송을 시도하기 전에 한 프레임 동안 슬롯의 사용정보를 파악하고, 전송중인 선박은 자신의 전송위치를 제외한 나머지 슬롯에서 슬롯의 사용 여부를 수신하도록 설정되었다.

매 프레임마다 선박이 전송을 시도하는 슬롯의 수를 전송률 s_{limit} 으로 정의한다. 주어진 전송률에 따라 각 선박이 슬롯을 선택할 때 2개 이상의 선박이 동일한 슬롯을 선택하여 전송에 실패할 확률을 낮추기 위해 선박이 균일한 분포로 슬롯을 선택한

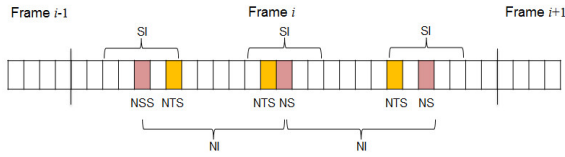


그림 1. SO-TDMA 프로토콜의 프레임 구조
Fig. 1. Frame Structure for SO-TDMA

다. 그림 1에서 보는 바와 같이 각 선박은 전송을 위해 우선 프레임 내에 임의의 한 슬롯을 기준 슬롯(Nominal Start Slot: NSS)으로 선택하고, 주어진 전송률에 따라 사용할 슬롯들간에 대략적인 간격(Nominal Increment: NI)을 맞추기 위해 $NI = 2250/s_{limit}$ 로 설정한다. 즉, s_{limit} 을 만족하기 위해 NI슬롯 주기로 전송 기회가 주어지게 된다. NSS는 선박이 전송을 위해 선택할 슬롯이 존재하게 될 구간의 기준점이 되는 슬롯으로서, 슬롯의 선택을 위해 NSS를 중심으로 다음과 같이 전송가능 범위(Selection Interval: SI)를 설정한다.

$$NSS - cNI \leq SI \leq NSS + cNI \quad (1)$$

여기서, c 는 SI의 범위를 결정하기 위한 상수로서 $c \leq 1$ 이며, SO-TDMA에서는 $c = 0.1$ 로 사용되었다^[7]. 선박은 자신의 전송 가능 범위 내에서 가용한 슬롯들 중에 임의로 1개의 슬롯(Nominal Transmission Slot: NTS)을 선택하여 패킷을 전송한다. 이때, 가용한 슬롯은 이전 프레임에서 사용이 끝난 슬롯과 2개 이상의 선박이 경쟁 과정에서 충돌하여 주인이 결정되지 않은 슬롯, 그리고 아무 선박도 전송을 시도하지 않은 슬롯을 말한다. 다음 슬롯을 선택하기 위해서 NSS를 기준으로 NI만큼 떨어진 슬롯을 NS로 설정한 후, 위와 동일한 방식으로 선택 구간을 설정하고 전송 슬롯을 선택하여 전송한다. 주어진 전송률에 따라 NI를 설정하였기 때문에 매 프레임마다 s_{limit} 의 전송률로 전송을 시도하게 된다. 이 과정에서 전송에 성공한 슬롯은 특정한 수의 프레임 구간 동안('timeout'이라고 지칭함)

해당 선박에게 예약되며, timeout 값은 각 선박이 3과 8 사이의 값을 랜덤하게 결정한다. 각 선박은 위의 과정에서 선택한 슬롯에 전송을 시도할 때 마다 timeout값을 1씩 감소시키며, 해당 슬롯의 timeout 값이 0이 되면 슬롯의 사용을 중단하고 자신의 SI범위 내에 가용한 슬롯 중에 하나를 다시 선택하여 전송을 시도한다.

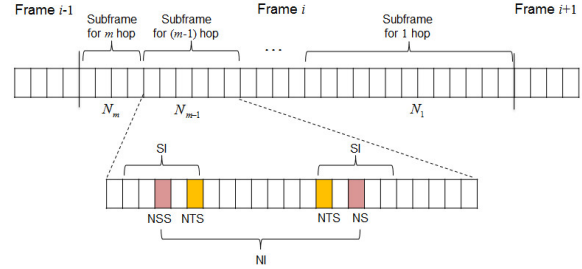


그림 2. ASO-TDMA 프레임 구조
Fig. 2. Frame Structure for ASO-TDMA

2.2. ASO-TDMA의 기본 개요

ASO-TDMA는 넓은 영역에 분포하는 선박들에 대해서 다중-홉 통신을 지원하기 위해 그림 2와 같이 하나의 SO-TDMA 프레임을 다수 개의 부프레임으로 분할하고, 각 부프레임을 사용하는 선박들이 SO-TDMA 절차에 따라 자원을 공유하도록 설계된 MAC 프로토콜이다^[4,5]. ASO-TDMA에서 각 선박은 GPS를 이용하여 육상기지국과 자신의 직선거리를 계산하고, 해당 거리를 VHF대역 커버리지로 나누어 육상 기지국에 도달하기 위한 홉 수를 계산하여 홉 수에 따라 정해진 부프레임을 사용한다. 동일한 홉 영역에 존재하는 선박들은 같은 부프레임을 사용하고, 인접한 홉들 간에는 서로 다른 부프레임을 할당하기 때문에 물리적인 거리에 따라 간섭이 미치지 않는 홉들 간에는 재사용이 가능하다.

VHF 대역 커버리지가 x km인 통신시스템에서 부프레임의 수가 m 개 이고 육상기지국과의 거리가 y km 떨어진 선박이 존재한다면, 해당 선박이 사용할 부프레임 j 는 다음과 같이 계산되며,

$$j = \lceil y/x \rceil \bmod m \quad (2)$$

그림 3은 부프레임의 개수 $m = 3$ 인 ASO-TDMA의 프레임 구조를 예시한 것이다.

2.3. 기존 ASO-TDMA 프로토콜의 문제점

하나의 프레임을 3개의 부프레임으로 분할하여 공간적으로 자원을 재사용하는 ASO-TDMA 방식에서는 각 홉 영역별로 고정된 크기의 채널자원을 할당하고 영역 내에서만 해당 자원을 사용할 수 있도록 설정되어있기 때문에, 그림 4와 같이 중단간에 메시지를 주고받는데 일반적으로 1개 프레임(60초) 이상의 지연시간이 발생하며, 이러한 프레임 구조는 실시간 서비스를 지원하는데 한계가 있다.

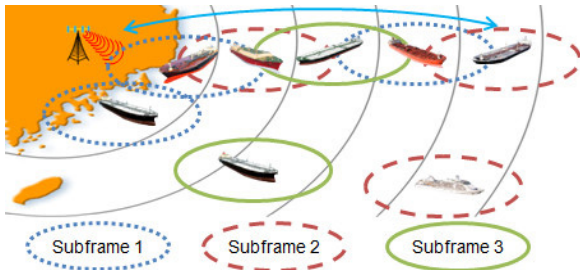


그림 3. VHF 대역 다중-홉 선박 통신망
Fig. 3. VHF Band Multi-hop Maritime Communication Network

또한, ASO-TDMA 프로토콜은 분산적인 경쟁을 통해 자원을 획득하는 방식이므로 실시간 사용자에 대해서 차별적으로 자원 획득에 대한 우선권을 구현하지 못한다. 즉, 실시간 사용자에 대해 비실시간 사용자에 비해 우선적으로 전송률을 보장할 수 있어야 하나 ASO-TDMA 프로토콜에서는 우선권을 지정할 수 있는 기능이 존재하지 않기 때문에 실시간 사용자가 원하는 수준의 전송률을 보장할 수 있는 방안이 없다. 따라서, 본 논문에서는 실시간 사용자들이 원하는 수준의 종단간 지연시간과 전송률을 보장할 수 있도록 실시간 및 비실시간 사용자가 사용하는 자원 영역을 분리하여 실시간 서비스의 품질을 보장할 수 있는 새로운 형태의 프레임 구조를 제안한다. 제안하는 MAC 프로토콜에서는 각 홉 영역에 존재하는 라우팅 경로상의 선박들이 연속된 시간자원을 사용할 수 있도록 설계하였기 때문에 기존 ASO-TDMA보다 매우 낮은 종단간 지연시간으로 통신이 가능하다.

한편, 실시간 사용자의 서비스 품질을 보장하기 위해 너무 많은 자원을 할당하게 되면 비실시간 사용자의 수율 성능이 저하될 것이다. 즉, 실시간 사용자들의 전송률을 보장하기 위해 불필요하게 과도한 양의 자원을 할당하면 원하는 전송률을 보장받지 못할 확률은 줄어들지만 사용되지 못하는 자원의 양이 늘어나기 때문에 시스템의 관점에서 자원이 낭비되는 것으로 볼 수 있다. 따라서, 실시간 사

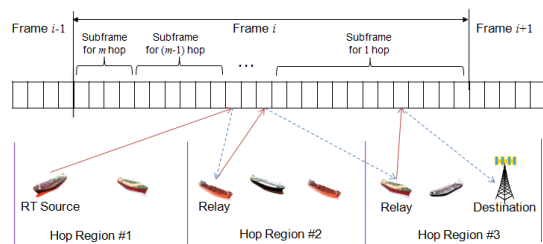


그림 4. ASO-TDMA의 종단간 지연시간 예시
Fig. 4. End-to-end delay example for ASO-TDMA Protocol

용자의 품질을 보장하는 범위 내에서 최소한의 자원을 실시간 사용자에 할당하고 나머지 자원을 비실시간 사용자에 할당함으로써 시스템 수율을 최대화할 수 있다. 본 논문에서는 실시간 사용자에 대한 전송 불능 확률을 기준으로 필요한 실시간 자원의 양을 계산하여 동적으로 실시간 및 비실시간 자원의 양을 제어하는 방안을 제안한다.

III. 통합 서비스를 위한 프레임 구조

제안하는 MAC 프레임 구조는 ASO-TDMA 프로토콜을 사용하는 선박과 호환성을 확보하기 위해 기존 프레임의 구조를 기본으로 유지한다. 이때, 실시간 서비스의 종단간 지연 시간 성능을 보장하기 위한 자원 영역을 확보하고, 나머지 자원을 비실시간 사용자들이 공유할 수 있도록 한다. 이때 각 프레임은 다수의 Dynamic Space-time Subframe (DSTS)로 분할되며, 하나의 DSTS는 실시간 서비스를 지원하기 위한 N 개의 real-time (RT) 슬롯들과 비실시간 서비스를 지원하기 위한 M 개의 non-real-time (NRT) 슬롯들로 구성된다(그림 5참조). 각 RT 슬롯은 각 홉 영역별로 할당되며, NRT 슬롯들은 DSTS 단위로 각 홉 영역에 할당된다.

n 번째 홉 영역의 RT 사용자들은 각 DSTS에 있는 RT 슬롯 # n 에서 전송을 시도하며, 동일한 홉 영역에 존재하는 선박들 간에는 경쟁을 통해 자원을 획득한다. 동일한 홉 영역에 존재하는 실시간 선박들이 다수의 DSTS 중에서 자신이 전송할 DSTS를 선택하는 방법은 ASO-TDMA 프로토콜에서와 동일하다. 다수의 DSTS 중에서 기준이 되는 DSTS를 설정하고 선박의 전송률에 따라 일정한 간격으로 전송 가능 범위를 설정한 후에 범위 내에서 랜덤하게 DSTS를 선택하여 전송을 시도한다. 선박이 성공적으로 전송한 DSTS는 다수의 프레임 구간에 걸쳐 해당 선박에게 예약되며, 예약되는 프레임의 수는 ASO-TDMA 프로토콜에서의 timeout과 동일하게 결정된다.

그림 6는 3개의 홉 영역에 걸친 실시간 서비스 선박의 종단간 전송 과정을 예시하고 있다. 여기서, DSTS에 대해 $N=3$ 와 $M=3$ 을 가정한다. 즉, 실시간 서비스를 위해 3개의 RT 슬롯이 지정되고, 비실시간 서비스에 대해 나머지 3개의 NRT 슬롯이 지정된다. 첫 번째 홉 영역에서 RT 슬롯 #1을 획득하면 경로상의 두 번째와 세 번째 홉 영역들에 있

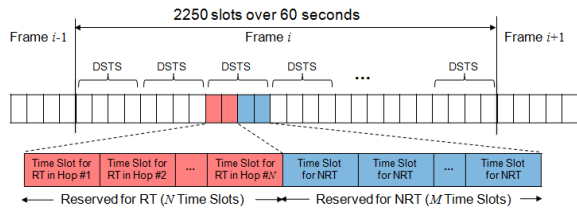


그림 5. 제안하는 MAC 프레임 구조
Fig. 5. Proposed MAC Frame Structure

중계 선박들이 각각 RT 슬롯 #2와 RT 슬롯 #3를 경쟁하지 않고 사용할 수 있도록 연속적으로 예약함으로써 종단간에 지연 없이 전송이 가능하도록 한다. 즉, 홉 영역 #1의 RT 사용자가 RT 슬롯 #1을 획득하여 전송하면, 홉 영역 #2의 선박들은 해당 슬롯의 메시지를 수신함으로써 해당 DSTS가 홉 영역 #1의 RT 사용자에게 예약된 것으로 인지할 수 있다. 따라서 홉 영역 #1의 RT 사용자의 라우팅 경로 상에 존재하는 릴레이 선박을 제외한 홉 영역 #2의 나머지 선박들은 전송이 제한되며, 릴레이 선박은 경쟁 없이 RT 슬롯 #2를 통해 데이터를 전송한다. 위와 같은 방식으로 다음 홉 영역에 있는 릴레이 선박 또한 이전 홉 영역에서 전송한 데이터를 수신하여 별도의 경쟁 없이 자신의 홉 영역에 할당된 RT 슬롯을 통해 최종 목적지까지 전달한다. 기존의 ASO-TDMA에서는 슬롯 단위로 자원을 예약하기 때문에 자신이 사용할 자원만을 예약하지만, 제안하는 프레임 구조에서는 DSTS 단위로 자원을 예약하기 때문에 라우팅 경로상의 노드의 자원까지 한 번에 예약하여 종단간 지연시간을 단축할 수 있다. 실시간 전송은 비실시간 자원에서 라우팅 경로를 설정한 후에 이루어지며, 기존에 연구된 다양한 라우팅 알고리즘이 경로 설정을 위해 사용될 수 있다.

DSTS의 NRT 슬롯들(그림 6에서 #4로 표시된 슬롯들)은 각 홉 영역 별로 직교적으로 할당하며, 이러한 홉 영역 별 할당을 통해 이격 거리가 충분히 큰 홉 영역 간에 공간적으로 재사용이 가능하다. 이때 NRT 사용자들은 자신의 홉 영역에 할당된 다수의 DSTS 내에 존재하는 NRT 슬롯들에 대해

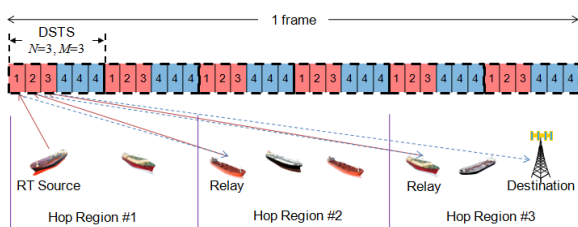


그림 6. 종단간 전송 과정 예시
Fig. 6. End-to-end Transmission: Example

ASO-TDMA 프로토콜과 동일한 전송 방식으로 데이터를 전송한다. 만약 선박이 실시간 및 비실시간 자원을 동시에 전송해야한다면 실시간 자원은 DSTS의 RT 슬롯을 통해 전송하고 비실시간 자원은 DSTS의 NRT 자원을 통해 전송함으로써 독립적으로 트래픽을 전송할 수 있다.

IV. 적응적 프레임 구조 제어

앞에서 제안하는 MAC 프레임 구조에서 실시간과 비실시간 서비스를 통합 지원하기 위해 각 DSTS는 RT 슬롯과 NRT 슬롯으로 분할되며, 이때 이들 슬롯의 비율이 정해져야 한다. 이때 실시간 사용자의 품질을 보장하기 위해 실시간 사용자의 부하에 따라 필요한 RT 슬롯의 수를 동적으로 결정해야 한다. 즉, 실시간 사용자가 자신의 최소 요구 전송률을 보장받지 못하는 상황을 불능(outage)으로 정의하고, 사용자의 불능 확률이 목표 값 이하를 갖도록 적응적으로 실시간 자원의 양을 제어해야 한다. 하나의 프레임이 K 개의 DSTS로 구성된다면, RT 슬롯의 수 N 과 NRT 슬롯의 수 M 은 $N+M = \lfloor 2250/K \rfloor$ 에 의해 결정된다. 한편, N 은 인접 홉 영역간의 간섭을 고려한 공간적 재사용 특성에 따라 일반적으로 $N=3$ 을 적용한다. 따라서 실시간 자원의 양은 $N=3$ 으로 고정하고, K 의 값을 제어하는 것이 적절하다. $N=3$ 일 때 K 값이 결정되면 NRT 슬롯의 수 M 이 결정된다.

불능은 실시간 사용자의 전송률 R 이 최소 요구 전송률 R_{min} 보다 떨어지는 상황에 해당하며, 실시간 사용자의 불능 확률은 실시간 사용자의 수 n 과 실시간 사용자의 전송률 R 이 주어졌을 때, 프레임을 구성하는 DSTS의 수 K 에 의해 결정된다(즉, $N=3$ 일 때 한 프레임에서 할당되는 RT 슬롯의 수는 총 $3K$ 임). 제안하는 프레임 구조는 한번 전송에 성공하면 여러 프레임에 걸쳐 자원을 예약하는 방식을 사용하기 때문에 안정 상태(steady state)에서 실시간 선박의 평균 불능확률 $p_{out}(K)$ 을 계산하며, 이후의 내용에서는 목표 불능 성능 p_0 을 만족하는 최적의 K 값을 분석한다(즉, $p_{out}(K) \leq p_0$ 이어야 함).

K 개의 DSTS로 구성된 프레임을 고려해보자. 홉 영역 #1에 존재하는 선박은 K 개의 DSTS중에서 일부를 사용하고, 홉 영역 #2에 존재하는 선박은 홉 영역 #1에서 사용하고 남은 DSTS중에서 일부를 사용한다. 이전의 홉 영역에 존재하는 선박들에 의해

예약된 DSTS는 경로상에 정해진 선박에 의해 중계의 용도로만 사용되기 때문에 n 번째 홉 영역에서 선박이 자신의 데이터를 보내기 위해 사용할 수 있는 DSTS의 수는 1홉부터 $(n-1)$ 홉에서 점유되고 남은 DSTS의 수와 같다. 안정 상태에서 홉 영역 i 에 존재하는 선박에 의해 예약되는 DSTS의 평균 비율을 $R_{th}^{(i)}$ 이라고 했을 때, n 번째 홉 영역에 할당되는 DSTS의 수 K_n 는 다음과 같이 표현된다.

$$K_n = K \prod_{i=1}^{n-1} (1 - R_{th}^{(i)}) \quad (3)$$

$R_{th}^{(i)}$ 는 i 번째 홉 영역에 할당되는 DSTS의 수 K_i 와 i 번째 홉 영역에 존재하는 선박의 수 n_i , 그리고 선박의 전송률 R_i 에 의해 결정되며, 위의 변수들이 주어졌을 때 $R_{th}^{(i)}$ 을 계산하는 방법은 ASO-TDMA에서 슬롯의 점유율을 계산하는 방법과 동일하므로 [6]의 수율분석 방법을 참조할 수 있다. 한편, 식 (3)에서는 각 홉 영역에서 계산되는 $R_{th}^{(i)}$ 에 따라 다음 홉에 할당되는 DSTS의 수 K_{i+1} 가 결정되기 때문에 홉 영역 #1부터 순차적으로 계산할 수 있어야 할 필요가 있다. $R_{th}^{(i)}$ 는 계산 가능한 값이므로 고정된 값으로 두고 분석을 진행한다.

홉 영역 i 에 할당되는 DSTS의 수는 홉 수가 늘어날수록 적어지기 때문에 (즉, $K_1 \geq K_2 \geq \dots \geq K_n$) 모든 홉 영역에 존재하는 실시간 사용자가 목표 불능을 만족하기 위해서는 마지막 홉 영역의 불능 성능을 기준으로 전체 DSTS의 수를 제어해야 한다.

마지막 홉 영역의 index를 z 라 하자. 홉 영역 # z 에서 K_z 개의 가용한 DSTS에 대해 n_z 개의 선박이 R_z 의 전송률로 전송을 시도하면, 안정상태에서 $K_z R_{th}^{(z)}$ 개의 DSTS가 예약된다. 예약된 DSTS는 각 선박의 R_z 회 전송에 의해 예약된 것이므로, 예약된 DSTS들이 고르게 분산되어 있다고 가정하면, 선박의 1회 전송에 대한 DSTS의 점유 확률 p_{occupy} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_{occupy}(K) = \frac{K_z R_{th}^{(z)}}{n_z R_z} = \frac{K R_{th}^{(z)} \prod_{i=1}^{z-1} (1 - R_{th}^{(i)})}{n_z R_z} \quad (4)$$

각 선박은 각각의 전송가능 범위에서 R_z 번 전송을 시도할 때 독립적으로 DSTS를 선택하여 전송을 시도하기 때문에 선박의 불능확률 $p_{out}(K)$ 은 다음과 같이 계산되며,

$$p_{out}(K) = 1 - (p_{occupy}(K))^{R_z} \quad (5)$$

$$= 1 - \left(\frac{K R_{th}^{(z)} \prod_{i=1}^{z-1} (1 - R_{th}^{(i)})}{n_z R_z} \right)^{R_z}$$

목표 불능 성능 $p_{out}(K) \leq p_0$ 를 만족하는 K 를 찾기 위해 K 에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$K \geq \frac{n_z R_z (1 - p_0)^{\frac{1}{R_z}}}{R_{th}^{(z)} \prod_{i=1}^{z-1} (1 - R_{th}^{(i)})} \quad (6)$$

식 (6)에서 $R_{th}^{(i)}$ 는 K_i , n_i , R_i 에 의해 결정되기 때문에 한번에 K 값을 계산할 수 없다. 즉, 홉 영역 #1에 존재하는 선박의 수와 전송률에 따라 $R_{th}^{(1)}$ 을 계산한 후에 남은 DSTS의 수 K_2 를 계산하여 홉 영역 #2에 존재하는 선박의 수와 전송률에 따라 $R_{th}^{(2)}$ 를 계산하는 형태로 반복적으로 계산해야 한다. 따라서, 식 (6)을 만족하는 DSTS의 최소값 K^* 을 찾기 위해서는 모든 가능한 K 값을 대입해야 하지만, (6)의 좌/우변을 반복적으로 계산하여 차선의 K 값을 도출할 수 있다. 프레임 구성하는 DSTS의 수는 육상의 기지국이 앞에서 설명한 과정에 의해 결정되며, 이 결과에 따라 주기적으로 프레임 구조의 변경을 알리는 메시지를 방송한다. RT 사용자의 수와 전송률은 각 홉 영역에 존재하는 선박이 육상 기지국에게 전송하는 데이터를 수집하여 확인이 가능하며, 프레임 구조를 변경하는 주기와 프레임 구조를 알리는 방송의 오버헤드에 따라 득실이 발생할 수 있으므로 구현 과정에서 최적화가 필요하다.

V. 성능 분석

본 장에서는 각 홉 영역에 존재하는 실시간 사용자의 수와 사용자의 전송률이 주어졌을 때, DSTS의 수에 따른 실시간 사용자의 불능 성능을 확인한다. 선박의 전송범위는 30km이고, 각 홉 영역의 간

표 1. SO-TDMA 동작을 위한 변수
Table 1. Simulation Parameter for SO-TDMA Operation

N_{total}	2250
c	0.1
TMO_MIN	3
TMO_MAX	8

격은 30km로 설정되었기 때문에 선박의 물리적 위치는 고려하지 않는다. 동일 한 홉 영역에 존재하는 선박이 동일한 슬롯에서 전송을 시도하는 경우를 전송에 실패한 것으로 설정하였다. 한 프레임동안 RT 사용자가 정해진 전송률로 전송하는 동안 1회 이상 전송실패가 발생하는 상황을 확인한다. 본 논문에서 제안하는 MAC 프레임 구조는 SO-TDMA와 후방위 호환성을 가지도록 설계되었기 때문에, 표 1에서 보는 바와 같이 SO-TDMA와 동일한 파라미터를 사용한다. 또한, 추가적으로 DSTS에서 RT슬롯의 개수 N 은 공간적 재사용을 고려하여 $N=3$ 으로 설정하였고, M 은 DSTS의 수에 따라 자동적으로 결정된다. 불능 성능을 확인하기 위해 목표 불능 확률은 0.1로 설정하였다(즉, $p_0 = 0.1$).

그림 7은 각 홉 영역에 n 명의 실시간 선박이 전송률 $s_{limit} = 2$ 로 전송을 할 때 DSTS 개수의 변화에 따른 실시간 선박의 불능 확률을 나타낸다. 한편, 그림 8는 DSTS의 수와 선박의 전송률이 주어졌을 때, 실시간 사용자 수의 변화에 따른 실시간 선박의 불능 확률을 나타낸다. 이를 통해 DSTS의 수와 선박의 수에 따라 불능 성능이 어떻게 영향을 받는지를 정확히 확인할 수 있다. 여기서 계산 결과는 식 (5)에 의해 계산된 것이며, 시뮬레이션 결과는 안정상태에 도달한 실시간 선박의 불능 확률을 측정한다. 시뮬레이션 상의 모든 결과는 동일한 조건에서 실험을 200회 실시한 후에 평균값을 계산한 것이다. 시뮬레이션을 수행할 때 각 실시간 선박이 첫 프레임에서 기준이 되는 DSTS를 선택한 후에 안정상태가 될 때까지 기준 DSTS를 변경하지 않고 그대로 사용하기 때문에 최초에 선정하는 DSTS의 위치에 따라 안정상태에서 선박의 불능 확률이 달라진다. 만약에 선박들의 기준 DSTS가 한곳에 집중되면 선박의 전송 가능 범위가 겹치기 때문에 불능 확률이 높아질 수 있기 때문에, 계산 결과와 실험결과에 대한 오차는 1~3% 정도의 범위에서 발생하는 것을 관찰할 수 있다.

그림 9은 선박의 수를 변화시키면서 요구 전송률

에 따라 실시간 사용자의 불능 성능을 만족하기 위해 필요한 DSTS의 수를 계산한 것이다. 여기서, 선박의 수가 증가하면서 필요한 DSTS의 수는 선형적으로 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 이때 선박의

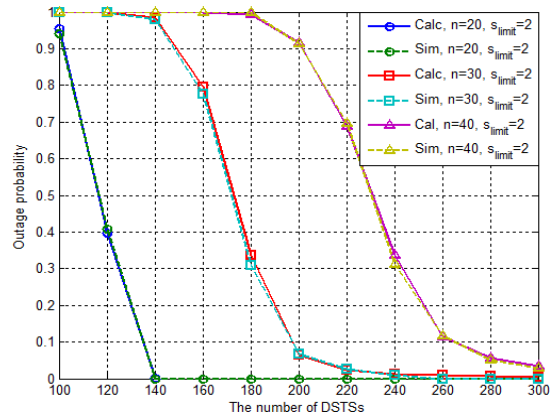


그림 7. 실시간 사용자와 DSTS의 변화에 따른 불능 확률
Fig. 7. Outage Probability for Varying the Numbers of RT Terminals and DSTS

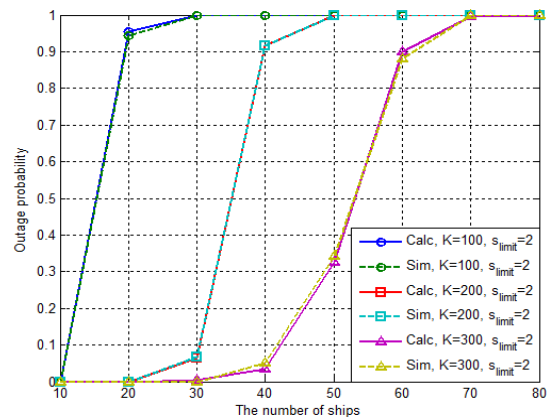


그림 8. 실시간 사용자와 DSTS의 변화에 따른 불능 확률
Fig. 8. Outage Probability Comparison for Varying the Numbers of RT Terminals and DSTS

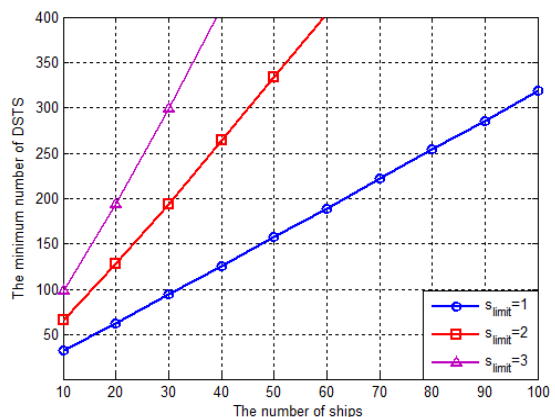


그림 9. 실시간 사용자와 전송률의 변화에 따라 요구되는 최소 DSTS의 수
Fig. 9. The Minimum Number of DSTSs for the Given Number of RT Terminals and Transmission Rate

수가 증가할 때 필요한 DSTS의 수에 대한 기울기는 요구 전송률에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 요구 전송률에 따라 필요한 DSTS의 수에 대한 비율은 선박의 수가 증가할수록 증가하는 것을 의미한다. 한편, 각 요구 전송률에 대한 선박의 수와 필요한 DSTS 간 기울기는 정확하게 정비례하지 않는 것을 관찰 할 수 있다. 즉, s_{limit} 이 1인 경우와 2인 경우의 기울기를 비교해 보면 정확하게 2배가 아니고 2보다 약간 더 큰 값을 가진다. $s_{limit} = 2$ 인 경우에 대한 불능 확률은 $s_{limit} = 1$ 인 경우의 불능 확률을 2배 한 값보다 크기 때문에, $s_{limit} = 2$ 일 때에 불능 성능을 만족하기 위해 필요한 DSTS의 수는 $s_{limit} = 1$ 일 때 필요한 DSTS의 수의 2배 이상이 된다.

VI. 결 론

본 논문에서는 ASO-TDMA 프로토콜에서 실시간 사용자의 최소 요구 전송률과 종단간 지연시간을 보장할 수 없음을 인지하고, 실시간과 비실시간 사용자를 동시에 지원할 수 있는 새로운 프레임 구조를 제안하였다. 제안하는 MAC 프레임 구조에서는 종단간의 지연시간을 단축하기 위해 프레임 내에 DSTS (Dynamic Space-Time Subframe)라는 기본 단위를 두고, 실시간 및 비실시간 자원이 교차적으로 나타나도록 설계하였다. 실시간 선박이 자신이 전송 가능한 슬롯을 통해 DSTS를 예약하여 라우팅 경로상에 존재하는 선박들이 경쟁 없이 자원을 사용함으로써 종단간의 지연시간을 단축시킴으로써 실시간 서비스 품질을 지원할 수 있다. 또한, 실시간 선박의 최소 요구 전송률을 보장하기 위해 실시간 및 비실시간 사용자의 자원을 분할하고 실시간 사용자에게 목표 불능 성능을 만족할 수 있도록 적응적으로 자원을 할당하도록 설계하였다.

향후 연구에서는 이와 같이 실시간 사용자들의 품질을 유지하면서 지원할 수 있는 비실시간 사용자들의 수율 성능을 분석함으로써 서비스 통합에 따른 효율성에 대한 분석이 필요하다.

References

[1] ITU, *Characteristics of VHF radio systems and equipment for the exchange of data and electronic mail in the maritime mobile service*

RR Appendix 18 channels, Recommendation ITU-R M.1842-1, June 2009.

- [2] K. H. Jeon, B. Hui, K. H. Chang, S. G. Kim, S. M. Kim, and Y. K. Lim, "Performance analysis of channel compensation and channel coding techniques based on measured maritime wireless channel in VHF-band ship Ad-hoc network," *J. KICS*, vol. 36, no. 5, pp. 517-529, Mar. 2012.
- [3] Y. B. Kim, K. H. Chang, C. H. Yun, J. W. Park, and Y. K. Kim, "Application scenarios of nautical Ad-hoc network in wireless mobile communication under maritime environment," *Int. J. Inform. Commun. Eng.*, vol. 13, no. 10, pp. 2097-2104, Oct. 2009.
- [4] B. Hui, K. H. Jeon, K. H. Chang, S. G. Kim, J. W. Park, and Y. K. Lim, "Design of Radio Transmission Technologies for VHF Band Ship Ad-hoc Network," in *Proc. Int. Conf. ICT Convergence 2011 (ICTC 2011)*, pp. 626-629, Seoul, Korea, Sep. 2011.
- [5] C. H. Yun and Y. K. Lim, "ASO-TDMA: ad-hoc self-organizing TDMA protocol for shipborne ad-hoc networks," *EURASIP J. Wireless Commun. Network*, vol. 2012, no. 1, pp. 626-629, Dec. 2012.
- [6] K. M. Cho, C. H. Yun, and C. G. Kang, "Throughput analysis of ASO-TDMA in multi-hop maritime communication network," *J. KICS*, vol. 37B, no. 9, pp. 741-749, Sep. 2012.
- [7] ITU, *Technical characteristics for a universal shipborne automatic identification system using time division multiple access in the VHF maritime mobile band*, Recommendation ITU-R M.1371-2, Mar. 2006.

조 구 민 (Kumin Cho)



2009년 8월 명지대학교 통신공학과 학사
 2010년 3월~현재 고려대학교 전기전자전파공학과 석박사통합과정
 <관심분야> 무선통신 시스템

윤 창 호 (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 (KIOST) 해양시스템 연구부 선임연구원
2009년~현재 과학기술연합대학원대학교 해양정보통신공학과 겸임교수
<관심분야> 수중 네트워크, 해양 선박 네트워크

임 용 곤 (Yong-Kon Lim)



1979년 충남대학교 전기공학 학사
1984년 충남대학교 전기공학 석사
1994년 아주대학교 전자공학 박사
1980년~현재 한국해양과학

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

강 충 구 (Chung G. Kang)



1987년 6월 Univ. of California (San Diego), 전자공학과 학사
1993년 3월 Univ. of California (Irvine), 전자 및 컴퓨터 공학과 박사
1992년 7월~1993년 6월 (미)

Aerospace Corp. 연구원
1993년 3월~1994년 2월 (미) Rockwell International 연구원
2000년 9월~2001년 8월 (미) Center for Wireless Communication, UCSD 방문 교수
1994년 3월~현재 고려대학교 전기전자전파공학부 교수
2005년 1월~2005년 12월 한국통신학회 이동통신 연구회 위원장
2006년 1월~현재 한국통신학회 상임이사
2008년 2월~현재 TTA PG702 IMT-WiBro 프로젝트 그룹 의장
<관심분야> 이동통신 시스템, 무선 네트워크 및 응용 서비스