DBpia

논문번호 12-37B-09-03

한국통신학회논문지 '12-09 Vol.37B No.09
http://dx.doi.org/10.7840/kics.2012.37B.9.741

다중-홉 선박 통신 네트워크를 위한 애드혹 자율 구성 TDMA 방식의 수율 성능 분석

조 구 민◆, 윤 창 호*, 강 충 구*

Throughput Analysis of ASO-TDMA in Multi-hop Maritime Communication Network

Kumin Cho◆, Changho Yun*, Chung G. Kang**

요 약

항해 중인 선박과 육상기지국간에 VHF 대역을 통해 다중-홉 데이터 통신을 수행하기 위해 애드-혹 자율 구성 TDMA (Ad Hoc Self-Organizing TDMA: ASO-TDMA) 방식이 제안된 바 있으며, 이를 통해 해로를 따라 넓은 영역에 걸쳐 항해 중인 선박들이 분산적으로 무선 자원을 공유하면서 다중-홉 애드-혹 네트워크를 구성할 수 있다. 본 논문에서는 마코프 체인 모델을 기반으로 ASO-TDMA 방식 매체접근제어 프로토콜의 평균 수율 성능을 분석한다. 또한, 모의실험을 통해 수학적 분석 결과를 검증하고, 각 홉 영역에서 부프레임의 크기와 선박의 수에 따라 수율을 최대화하기 위한 최적의 전송률이 존재함을 보인다.

Key Words : VHF maritime communication, AIS (Automatic Identification System), Ad-hoc self-organizing-TDMA (ASO-TDMA), Throughput Analysis

ABSTRACT

Ad Hoc Self-Organizing TDMA (ASO-TDMA) has been proposed as a specification to support the multi-hop data communication service for ships over VHF band. It allows for organizing a multi-hop ad-hoc network in a distributed manner by sharing the radio resources among the ships navigating along the route. In this paper, Markov chain analysis is given to provide the average throughput performance for ASO-TDMA protocol Furthermore, the analytical results are verified with computer simulation, which shows that there exists the optimal transmission rate to maximize the average throughput as the subframe size and the number of ships are varying in each hop region.

Ⅰ. 서 론

해양에서의 통신은 주로 AIS (Automatic Identification System)와 같이 해상에 존재하는 선박들의 안전을 보장하기 위한 목적으로 사용되어 왔으며, 부가적으로 선박간의 정보 교환이 이루어질 수 있도록 설계 되었다. 이러한 통신 방식은 높은 전송률을 요구하는 서비스를 지원할 수 없기 때문에, 고속 데이터 통신을 위한 새로운 해양통신 시스템에 대한 연구의 필요성이 대두되었다. 이에 따라 ITU-

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

◆ 주저자 : 고려대학교 전기전자전파공학과 무선정보시스템공학 연구실, kumin84@korea.ac.kr, 준회원
* 한국해양연구원 해양시스템안전연구소, sgn0178@kordi.re.kr, 정회원
** 고려대학교 전기전자전파공학과 무선정보시스템공학 연구실, ccgkang@korea.ac.kr, 종신회원
논문번호 : KICS2012-08-351, 접수일자 : 2012년 8월 6일, 최종논문접수일자 : 2012년 9월 15일

www.dbpia.co.kr

R에서는 ITU-R M.1842-1 권고문을 통해 데이터 통신을 위한 새로운 VHF 대역 통신시스템에 대한 권고사항을 제시하였고, 또한 PHY 및 MAC 계층에 대해서 예시하였다[1]. 예를 들어, PHY 계층에서는 25kHz의 대역폭으로 정의된 해양통신용 VHF 채널에 대해, 최대 4개의 인접한 채널을 하나로 통합하여 100kHz의 대역폭을 갖는 통신시스템을 고려할 수 있다. 또한, MAC 계층에서는 AIS와 같이 기존에 존재하는 통신시스템과 호환성을 유지하도록 권고하였고, 해양 통신망이 셀룰러 망과 같이 VHF 채널 자원을 공간적으로 재사용하는 방법을 사용할 수 있음을 보였다. 새로운 통신시스템은 다수의 채널을 통합하여 동작하는 상황까지 고려하였기 때문에, 기존에 특정 채널을 사용 중인 통신시스템과 채널 자원을 공유하는 상황이 발생할 수 있다. 기존의 통신시스템은 선박의 안전 운항을 지원하기 위한 시스템이기 때문에, 데이터 통신을 위한 시스템이 기존의 통신시스템과 동일한 채널에서 동작하더라도 안전을 지원하기 위한 시스템의 동작에 지장을 주어서는 안 된다는 의미로 해석할 수 있다.

한편, 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 해양에 분포되어 있는 각 선박의 연결성을 보장하기 어렵다. 따라서, 전송거리를 확장하기 위한 선박간 애드혹 네트워크(Ship Ad-hoc NETwork: SANET)에 대한 연구가 진행되고 있다[2]. SANET에서는 기존 통신시스템과의 호환성을 유지하기 위한 방안으로 AIS에서 사용되는 SO-TDMA (Self Organizing TDMA: SO-TDMA) 프로토콜을 다중-홉 데이터 통신이 가능하도록 변형한 애드혹 자율 구성 TDMA (ad-hoc self-organizing-TDMA: ASO-TDMA) 방식의 MAC 프로토콜을 제시하였다[3,4]. 본 논문에서는 먼저 AIS에서 사용되는 SO-TDMA의 동작 절차에 대해 살펴보고, 다중-홉 통신에 SO-TDMA를 적용할 때 발생되는 문제점을 해결하기 위해 ASO-TDMA에서 추가적으로 고려되는 기능들에 대해서 살펴본다.

ASO-TDMA 프로토콜은 육상기지국과의 물리적인 거리에 따라 영역을 나누고, 각 영역별로 서로 다른 자원을 할당하여 상호 간섭을 최소화하는 방식이다. 선박들은 자신의 영역 내에서 다른 선박들과의 경쟁을 통해 정보를 전송하기 위한 자원을 획득하며, 한번 획득된 자원은 필요시에 일정 시간에 걸쳐 사용이 보장된다. 본 논문에서는 특정 영역에 존재하는 선박의 수, 할당된 자원, 선박의 요구 전송률이 주어졌을 때 ASO-TDMA 프로토콜의 수율 성능을 수학적으로 분석하고자 한다. 이를 위해 선박의 최소 자원 획득 단위인 슬롯을 기준으로, 경쟁에 참여하는 선박의 수와 가용한 슬롯의 수를 매 프레임 단위로 갱신하고, 평균 수율은 안정 상태에 도달했을 때 전체 중에서 실제로 사용 중인 슬롯의 비율로 계산된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 ASO-TDMA의 시스템 모델에 대해 설명하고, 3절에서는 ASO-TDMA 프로토콜의 수율에 대한 수학적 분석을 다룬다. 4절에서는 시뮬레이션을 통해 영역별로 할당된 자원과 해당 영역 내에 존재하는 선박의 수, 그리고 각 선박의 전송률에 따른 ASO-TDMA 프로토콜의 수율을 측정하여 수학적 분석 값과 비교하고, 마지막으로 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

Ⅱ. 시스템 모델

2.1. AIS를 지원하기 위한 SO-TDMA 프로토콜

AIS에서는 1분을 기본 단위로 하는 시간 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 획득한다.

SO-TDMA는 선박이 주기적으로 자신의 위치 및 항행 정보를 주변에 알릴 때 사용되는 MAC 프로토콜로서, 주기적으로 발생되는 트래픽의 특성 때문에 한 번의 경쟁에 의해 획득한 슬롯은 여러 프레임에 걸쳐 경쟁 없이 사용이 가능하도록 설계되었다[5]. SO-TDMA에서는 이미 사용 중인 슬롯에 대해 사용자의 권리를 보장하기 위해 이전 프레임에서 사용이 끝난 슬롯과 2개 이상의 선박이 경쟁 과정에서 충돌하여 주인이 결정되지 않은 슬롯, 그리고 아무 선박도 전송을 시도하지 않은 슬롯을 가용한 슬롯으로 보고, 이러한 슬롯들에 대해서만 전송 시도가 허용된다. 네트워크에 처음 진입하는 선박은 가용한 슬롯에 대한 정보가 없기 때문에 해당 프레임에서 바로 전송을 시도하지 않고, 한 프레임 동안

www.dbpia.co.kr

가용한 슬롯에 대한 정보를 수집한 후에 전송 절차를 수행한다.

SO-TDMA 프로토콜에서는 표 1의 파라미터를 사용하며, 다음의 설명에서는 여기서 표기된 약어를 적용한다.

표 1. SO-TDMA 약어표
Table 1. SO-TDMA Acronyms

NSS	Nominal Start Slot
NS	Nominal Slot
NI	Nominal Increment
SI	Selection Interval
NTS	Nominal Transmission Slot

매 프레임마다 선박이 전송을 시도하는 슬롯의 수를 전송률 s_{limit}으로 정의하자. 주어진 전송률에 따라 각 선박이 슬롯을 선택할 때 2개 이상의 선박이 동일한 슬롯을 선택하여 전송에 실패할 확률을 낮추기 위해 선박이 균일한 분포로 슬롯을 선택하도록 하는 방식을 사용한다. 그림 1에서 보는 바와 같이 각 선박은 전송을 위해 우선 프레임 내에 임의의 한 슬롯을 *NSS*로 선택하고, 주어진 전송률에 따라 사용할 슬롯들 간에 대략적인 간격을 맞추기 위해 $NI = 2250/s_{limit}$로 설정한다. 즉, s_{limit}을 만족하기 위해 *NI*슬롯 주기로 전송 기회가 주어지게 된다. *NSS*는 선박이 전송을 위해 선택할 슬롯이 존재하게 될 구간의 기준점이 되는 슬롯으로서, 슬롯의 선택을 위해 *NSS*를 중심으로 다음과 같이 *SI*를 설정한다.

$$NSS - cNI \le SI \le NSS + cNI \qquad (1)$$

여기서, c는 *SI*의 범위를 결정하기 위한 상수로서 $c \le 1$이며, SO-TDMA에서는 $c = 0.1$로 사용되었다.

선박은 자신의 선택 구간 내에서 가용한 슬롯들 중에 하나를 균일한 분포에 따라 전송 슬롯(*NTS*)으로 임의로 선택하여 패킷을 전송한다. 다음 슬롯을 선택하기 위해서 *NSS*를 기준으로 *NI*만큼 떨어진 슬롯을 *NS*로 설정한 후, 위와 동일한 방식으로 선택 구간을 설정하고 전송 슬롯을 선택하여 전송한다. 주어진 전송률에 따라 *NI*를 설정하였기 때문에 매 프레임마다 s_{limit}의 전송률로 전송을 시도하게 된다. 이 과정에서 선택된 슬롯은 특정한 수의 프레임구간 동안('timeout'이라고 지칭함) 동일한 슬롯 위치에서 해당 선박에 의해 사용되며, timeout 값은 각 선박이 3과 8 사이의 값을 랜덤하게 결정한다. 각 선박은 위의 과정에서 선택한 슬롯에 전송을 시도할 때 마다 timeout 값을 1씩 감소시키며, 해당 슬롯의 timeout 값이 0이 되면 기존에 사용하던 슬롯을 자신의 SI범위 내에 가용한 슬롯 중에 하나를 다시 선택하여 전송을 시도한다.

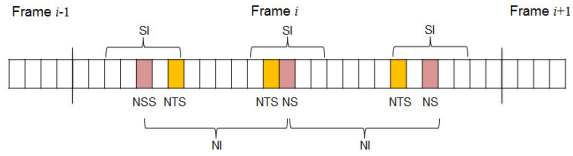

그림 1. SO-TDMA 프레임 구조
Fig. 1. SO-TDMA Frame Structure

SO-TDMA를 통해 전송되는 선박의 위치 및 항행 정보는 브로드캐스트되기 때문에 수신확인 응답(Acknowledgement: ACK) 정보를 수신하지 않도록 설계되어 있다. 따라서, 각 선박은 자신이 선택한 슬롯으로 전송하는 정보가 주변의 수신자들에게 제대로 수신되고 있는지 알지 못하기 때문에 2개 이상의 선박이 동일한 슬롯을 선택하는 충돌 현상이 일어나더라도 timeout이 될 때까지 충돌을 회피하는 어떠한 동작도 하지 못한다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 수신확인 메시지의 사용이 필수적이며, 2.2절에서 데이터 통신을 위한 ASO-TDMA의 동작 방식을 다룬다.

2.2. 데이터 통신을 지원하기 위한 ASO-TDMA의 개요

ASO-TDMA는 넓은 영역에 분포하는 선박들에 대해서 다중-홉 통신을 지원하기 위해 육상기지국을 기준으로 VHF대역 커버리지에 따라 공간영역을 나누고, 각 영역별로 시간자원을 공유하는 방식이다. 그림 2에서 보는 바와 같이 하나의 SO-TDMA 프레임을 다수의 부프레임(subframe)으로 분할한 후, 인접한 홉들 간에는 서로 다른 부프레임을 할당하여 직교성을 유지함으로써 상호간 간섭이 발생하지 않도록 한다. 한편, 물리적인 거리에 따라 간섭이 미치지 않는 홉들 간에는 재사용이 가능하도록 부프레임을 할당한다. 그림 3은 하나의 프레임을 3개의 부프레임으로 나누어 영역 별로 서로 다른 부프레임을 사용하는 경우를 예시한 것이다.

www.dbpia.co.kr

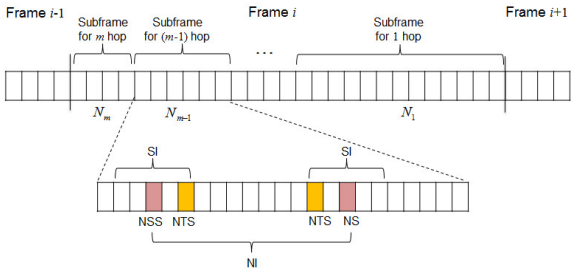

그림 2. ASO-TDMA 프레임 구조
Fig. 2. ASO-TDMA Frame Structure

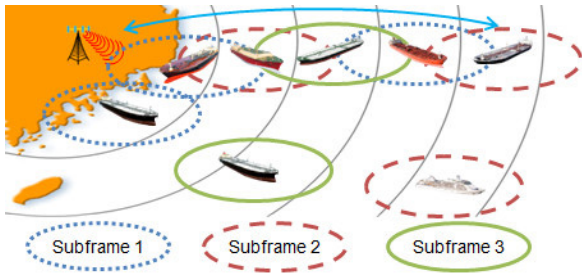

그림 3. VHF 대역 다중-홉 선박 통신망
Fig. 3. VHF Band Multi-hop Maritime Communication Network

각 선박은 GPS를 이용하여 자신의 위치를 확인한 후, 육상기지국과의 거리를 VHF 대역 커버리지로 나누어 영역별로 미리 정해진 부프레임 할당 방식에 따라 자신이 사용할 부프레임을 선택한다. 예를 들어, VHF 대역 커버리지가 x km인 통신시스템에서 부프레임의 수가 m개 이고 육상기지국과의 거리가 y km떨어진 선박이 존재한다면, 해당 선박이 사용할 부프레임 j는 다음과 같이 계산된다.

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

각 부프레임에서 선박이 슬롯을 선택하여 전송하는 방식은 SO-TDMA와 동일하다. 부프레임 내에 임의의 슬롯에서 *NSS*가 선택되고, 이를 기준으로 *NI* 간격마다 *NS*가 설정된다. 각 *NSS*와 *NS*들을 중심으로 *SI*가 설정되고, 각 *SI*범위 내에서 *NTS*를 선택하여 전송한다. 이때, SO-TDMA는 수신확인 메시지의 부재로 인해 슬롯간 충돌을 감지할 수 없었으나, ASO-TDMA는 NACK 방식의 수신확인 메시지를 이용하여 전송한 데이터의 충돌여부를 확인한다. 만약에 NACK 메시지에 의해 충돌 발생이 확인되면 다음 프레임의 해당 *SI*에서 새로운 *NTS*를 선택하여 전송한다.

단일 홉 통신에서는 기본적으로 송신자가 보낸 정보에 대한 수신확인을 위해 수신자가 ACK 또는 NACK 메시지를 송신하여 전송의 성공여부를 판단할 수 있게 된다. 그러나 다중-홉 통신에서는 중계 노드가 송신 노드로부터 받은 정보를 다시 수신 노드로 전달하기 때문에, 송신 노드는 중개 노드가 수신 노드로 보내는 정보를 엿들을 수 있다. 따라서 송신자는 중계 노드로부터 별도의 ACK 메시지를 받지 않더라도 수신확인이 가능하다. 따라서, ASO-TDMA에서는 정상적으로 수신되지 않은 정보에 대해서만 재전송을 요구하는 NACK 방식의 수신확인 방식을 사용함으로써 불필요한 제어정보를 줄일 수 있다.

본 논문에서는 적절한 부하 분산 라우팅을 이용하여 각 부프레임 내에 존재하는 모든 선박이 동일한 전송률로 전송하는 상황을 고려한다. 또한, 모든 노드에는 전송할 패킷들이 항상 대기하고 있는 full buffer 모델을 가정한다.

Ⅲ. 수율 분석

3.1. 수율의 정의 및 분석

특정 영역에 존재하는 선박들이 해당 영역에 할당된 부프레임에 데이터 패킷을 전송한다고 하자. 각 패킷은 부프레임을 구성하는 기본 단위인 슬롯을 통해 다른 선박에게 전송된다. 슬롯의 수는 한정되어있기 때문에 선박의 수가 적을 때는 각 선박이 상대적으로 많은 슬롯을 사용할 수 있지만, 반대로 선박의 수가 많을 경우에는 각 선박이 사용할 수 있는 슬롯의 수가 상대적으로 적을 것이다. 이때, 부프레임을 구성하는 슬롯들 중에서 사용되는 슬롯의 비율을 수율로 정의하면, 수율은 부프레임의 길이와 선박의 수, 그리고 선박의 전송률의 함수로 주어질 것이다. ASO-TDMA는 선박이 임의의 슬롯을 선택하여 패킷을 전송할 때 다른 선박이 전송한 패킷과 충돌 없이 성공적으로 전송하였다면 해당 슬롯은 다수의 프레임 동안 경쟁 없이 사용이 가능하도록 설계되었기 때문에 매 프레임마다 수율이 달라질 수 있다. 따라서, 이후의 분석에서는 특정 영역에 할당된 부프레임의 길이와 해당 영역에 존재하는 선박의 수, 그리고 선박의 전송률이 주어졌을 때에 각 슬롯의 timeout 값을 상태로 하는 마코프 체인(Markov Chain)을 형성하고 안정 상태에서 평균적으로 사용되는 슬롯의 비율을 계산함으로써 평균 수율을 분석한다[6]. 수율 분석에 필요한 변수의 기호 및 정의를 표 2에서 요약한다.

프레임 t의 시작점을 기준으로 부프레임을 구성하는 슬롯들 중에서 timeout 값이 k인 슬롯의 비율

www.dbpia.co.kr

표 2. 수율 분석을 위한 변수
Table 2. Parameters for Throughput Analysis

N_f	부프레임을 구성하는 슬롯의 수 The number of slots in subframe
n	선박의 수 The number of ships
$s_k(t)$	프레임 t에서 timeout 값이 k인 슬롯의 비율 Slot ratio that timeout value is k at frame t
$\overrightarrow{s(t)}$	$s_k(t)$로 구성된 상태 벡터 State vector
$p_t^{success}$	프레임 t에서 슬롯의 점유 확률 Slot's occupation probability at frame t
p_k	점유된 슬롯의 timeout 값이 k일 확률 probability that occupied slot's timeout value is k at frame t
$\mathbb{M}_{t,t+1}$	프레임 t에서 $t+1$로 시간의 변화에 따른 상태천이 행렬 State transition matrix at frame t

$s_k(t)$을 원소로 하는 벡터를 $\overrightarrow{s(t)}$라 하자 ($\overrightarrow{s(t)} \in R^{1\times K}$). ASO-TDMA에서 최대 timeout 값을 K라고 설정하면 $\overrightarrow{s(t)} = [s_0(t), s_1(t), ..., s_{K-1}(t)]$로 나타낼 수 있으며, $\sum_{k=0}^{K-1} s_k(t) = 1, \forall t$를 만족한다. 슬롯의 timeout 값은 바로 이전 프레임에서 전송에 성공했거나 이미 그 전에 전송에 성공한 슬롯을 사용하는 것이기 때문에 $s_k(t)$에서 k의 최대값은 $(K-1)$이 된다. 예를 들어, $s_0(t)$는 이전 프레임에서 어떤 선박도 전송을 시도하지 않은 슬롯의 비율과 2개 이상의 선박이 동시에 전송하여 충돌이 일어난 슬롯의 비율, 그리고 프레임 $(t-1)$까지 사용되다가 프레임 t에서 사용이 끝난 슬롯의 비율을 모두 더한 값으로, 결과적으로 이번 프레임에서 가용한 슬롯의 비율을 나타낸다. 아직 전송이 일어나지 않은 첫 번째 프레임($t=1$)에서는 모든 슬롯이 사용되지 않을 것이므로 $\overrightarrow{s(1)} = [1,0,...,0]$로 주어진다.

ASO-TDMA 슬롯의 관점에서 timeout 값은 선박이 패킷을 전송할 때마다 1씩 줄어들고, timeout 값이 0이 되면 $p_t^{success}$의 확률로 새로운 timeout 값을 선택하고 p_k의 확률로 timeout 값이 k가 된다. 매 프레임 단위로 변화하는 $\overrightarrow{s(t)}$를 마코프 체인으로 모델링하면 그림 4 의 상태천이도(state transition diagram)로 표현할 수 있다. ASO-TDMA에서는 timeout 값을 SO-TDMA와 동일하게 3과 8 사이에서 랜덤하게 선택하지만, 본 장에서는 분석을 일반화하기 위해 timeout 값을 1과 K 사이에서 랜덤하게 선택하도록 설정하고 각 timeout 값을 선택할 확률은 임의의 이산 확률분포로 주어졌다고 가정한다.

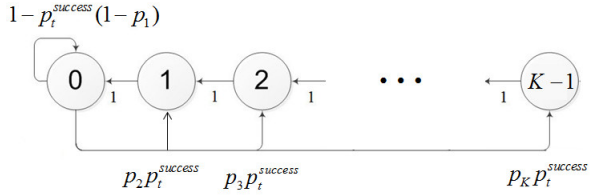

그림 4. 프레임 변화에 따른 상태천이도
Fig. 4. State Transition Diagram

t번째 프레임에서 $(t+1)$번째 프레임으로 시간이 지났을 때 $\overrightarrow{s(t)}$의 변화를 나타내는 행렬을 $\mathbb{M}_{t,t+1}$로 나타내자($\mathbb{M}_{t,t+1} \in R^{K\times K}$). 상태천이 행렬 $\mathbb{M}_{t,t+1}$은 다음과 같이 주어지며,

$$\mathbb{M}_{t,t+1} = \begin{bmatrix} m_{0,0}^{(t)} m_{0,1}^{(t)} & \cdots m_{0,K-1}^{(t)} \\ m_{1,0}^{(t)} m_{1,1}^{(t)} & \vdots \\ \vdots & \ddots \\ m_{K-1,0}^{(t)} \cdots & m_{K-1,K-1}^{(t)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

다음의 식을 만족한다.

$$\overrightarrow{s(t+1)} = \overrightarrow{s(t)}\mathbb{M}_{t,t+1} \quad (4)$$

$\mathbb{M}_{t,t+1}$을 구성하는 원소 $m_{i,j}^{(t)}$는 t번째 프레임에서 timeout 값이 i인 슬롯이 $(t+1)$번째 프레임에서 timeout 값이 j가 될 확률로 정의하며, t번째 프레임에서 특정 슬롯의 timeout 값을 $r(t)$라고 하면 $m_{i,j}^{(t)}$은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} m_{i,j}^{(t)} &= \Pr(r(t+1)=j | r(t)=i) \\ &= \begin{cases} 1-p_t^{success}(1-p_1), & i=0, j=0 \\ p_{j+1}p_t^{success}, & i=0, j\neq 0 \\ 1, & i=j+1 \\ 0, & otherwise \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $p_t^{success}$는 프레임 t에서 선박에 의해 슬롯이 점유될 확률을 나타내며, 자세한 계산 방법은 3.2절에서 다루도록 한다.

$\mathbb{M}_{t,t+1}$의 1행은 새롭게 점유되는 슬롯들의 확률분포를 나타내며, $2:K$ 행은 매 프레임마다 timeout 값이 1씩 줄어드는 것을 나타낸다. 즉, t번째 프레임의 시작점을 기준으로 $(t-1)$번째 프레임에서 가

www.dbpia.co.kr

용한 슬롯이 t번째 프레임에서 선박에 의해 $p_t^{success}$의 확률로 점유되고 동시에 p_k의 확률로 timeout 값이 k가 된다. 예를 들어, $(t-1)$번째 프레임에서 가용한 슬롯이 t번째 프레임에서 선박에 의해 점유되고 이때 timeout 값이 K가 될 확률은 $p_K p_t^{success}$이다. 이때, 해당 슬롯은 t번째 프레임에서 한번 전송을 하고 timeout 값이 $(K-1)$이 되었기 때문에 $s_{K-1}(t+1)$에 포함된다.

앞서 정의한 바와 같이 수율은 부프레임을 구성하는 슬롯들 중에서 데이터가 성공적으로 전송되는 슬롯의 비율을 의미한다. 따라서, 평균 수율은 안정 상태에서 사용 중인 슬롯의 비율로 주어지며, 이를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Lambda = \overrightarrow{s(1)} \prod_{t=1}^{t_\infty} \mathbb{M}_{t,t+1} \vec{v} \tag{6}$$

여기서, t_∞는 안정 상태에 도달하는데 필요한 프레임의 수를 나타내며, $\vec{v}$는 사용 중인 슬롯의 합을 계산하기 위해 벡터 값을 스칼라 값으로 변환하는 벡터를 나타낸다. 프레임의 시작점을 기준으로 timeout 값이 0인 슬롯은 $\pi^{success}$의 확률로 선박에게 점유되므로 $\vec{v}$의 첫 번째 원소는 $\pi^{success}$가 되고, 나머지는 1로 채워진다(즉, $\vec{v}=[\pi^{success},1,...,1]^T$, $\vec{v}\in R^{K\times 1}$).

3.2. 수율 계산을 위한 상태천이 행렬 분석

이전 프레임에서 슬롯을 확보한 선박은 경쟁 없이 슬롯을 사용하지만 슬롯을 확보하지 못한 선박은 ASO-TDMA에서 정의한 슬롯 획득절차에 따라 전송을 시도한다. ASO-TDMA에서는 선박이 일단 예약에 성공하면 다수의 프레임 동안 경쟁 없이 전송이 가능하도록 설계되었기 때문에 가용한 슬롯의 수와 경쟁에 참여하는 선박의 수가 매 프레임마다 달라진다. 따라서 $p_t^{success}$도 마찬가지로 시간에 따라 값이 변하게 되므로, 다음에서는 시간에 따라 변화하는 $p_t^{success}$를 구성 요소로 하는 상태천이 행렬 $\mathbb{M}_{t,t+1}$을 분석하고자 한다. 상태천이 행렬의 분석에 필요한 변수의 기호와 정의는 표 3과 같다.

ASO-TDMA에서는 모든 선박이 자신의 SI범위 내에서만 전송을 시도하도록 정의하고 있다. 따라서, $p_t^{success}$를 계산하기 위해서는 각 슬롯에 전송이 가능한 선박의 수 n_t^{SI}와 전송을 시도할 확률 p_t^{access}를 알아야 한다. 그러나 n_t^{SI}와 p_t^{access}는 매 프레임마다 달라지는 값이므로 본 논문에서는 첫 번째 프레임의 초기 값들을 이용하여 매 프레임마다 이 값을 갱신함으로써 $p_t^{success}$를 계산할 수 있다.

표 3. 상태천이 행렬 계산을 위한 변수
Table 3. Parameters for State Transition Matrix

N_t^{SI}	프레임 t에서 *SI*범위 내의 가용한 슬롯 수 The number of slots available in *SI* at frame t
n_t^{SI}	프레임 t에서 슬롯을 점유하기 위해 경쟁하는 선박의 수 The number of competing ships to occupy a slot at frame t
$p_t^{success}$	프레임 t에서 슬롯의 점유 확률 Slot's occupation probability at frame t
p_k	점유된 슬롯의 timeout 값이 k일 확률 probability that occupied slot's timeout value is k
p_t^{access}	*SI*범위 내의 슬롯에서의 전송확률 probability that a ship selects a slot within *SI*
$O(t)$	프레임 t에서 점유되는 슬롯의 수 the number of occupied slots
$R(t)$	프레임 t에서 점유가 해제되는 슬롯의 수 the number of released slots

우선, 첫 번째 프레임에서 임의의 슬롯에 전송하기 위해 경쟁하는 선박의수 n_1^{SI}를 계산해보자. 슬롯 관점에서, 특정 슬롯에 전송이 가능한 선박의 수는 해당 슬롯을 *SI*로 포함하는 선박의 수를 의미한다. 본 논문에서는 모든 선박들은 동일한 s_{limit}을 가지는 상황을 고려하고 있으므로 모든 선박은 동일한 *NI*와 *SI*를 가지며, 이를 이용하여 특정 슬롯에 접속 가능한 선박의 수를 계산할 수 있다. 각 선박이 N_f개의 슬롯 중에서 SI로 포함할 수 있는 슬롯의 수는 $s_{limit}(cNI+1)$로 주어지며, 선박의 *NSS*가 고르게 분포되어 있다고 가정하면 다음을 만족한다.

$$n_1^{SI} = n(2cN_f + s_{limit})/N_f \tag{7}$$

선박이 *SI*범위 내에서 가용한 슬롯을 선택하여 전송을 시도할 때 균일한 확률분포로 슬롯을 선택한다면 p_t^{access}는 t번째 프레임에서 선박의 SI범위 내에 존재하는 가용한 슬롯의 수 N_t^{SI}의 역수가 된다(즉, $p_t^{access}=1/N_t^{SI}$). N_t^{SI}는 $(t-1)$번째 프레임

www.dbpia.co.kr

에서 가용한 N_{t-1}^{SI}개의 슬롯들 중에서 $p_{t-1}^{success}$에 따라 일부 슬롯은 선박에 의해 점유되고 나머지 슬롯들은 점유되지 못한 채 가용한 슬롯으로 남아있게 된다. 또한 그 이전 프레임에서 선박에 의해 점유된 슬롯들 중에 일부는 t번째 프레임에서 슬롯의 사용이 해제되어 가용한 슬롯이 된다. 따라서 t번째 프레임에서 점유하는 선박의수 $O(t)$와 슬롯의 사용을 해제하는 선박의 수 $R(t)$를 이용하여 다음과 같이 N_t^{SI}를 나타낼 수 있다.

$$N_t^{SI} = N_{t-1}^{SI} - O(t) + R(t), t \geq 2 \tag{8}$$

한편, t번째 프레임에서 가용한 슬롯의 변화량은 슬롯을 획득한 선박의 변화량과 동일하므로 n_t^{SI}를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$n_t^{SI} = n_{t-1}^{SI} - O(t) + R(t), t \geq 2 \tag{9}$$

식 (8)과 (9)에서 사용된 $O(t)$와 $R(t)$는 ASO-TDMA에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$O(t) = N_{t-1}^{SI} p_{t-1}^{success} \tag{10}$$

$$R(t) = \begin{cases} \sum_{m=1}^{t-1} [N_{t-m}^{SI} p_{t-1}^{success} p_m], 2 \leq t < K+1 \\ \sum_{m=1}^{K} [N_{t-m}^{SI} p_{t-1}^{success} p_m], t \geq K+1 \end{cases} \tag{11}$$

임의의 슬롯이 성공적으로 점유될 확률 $p_t^{success}$은 슬롯에 하나의 선박만이 전송을 시도할 확률과 같기 때문에 위에서 계산한 p_t^{access}와 n_t^{SI}을 변수로 하는 이항분포로 표현이 가능하다.

$$p_t^{success} = \binom{n_t^{SI}}{1} p_t^{access} (1 - p_t^{access})^{n_t^{SI}-1} \tag{12}$$

매 프레임마다 식 (7)부터 (11)을 통해 $p_t^{success}$를 계산하여 프레임 단위로 $\mathbb{M}_{t,t+1}$을 갱신할 수 있으며, 이를 통해 식 (6)에서 정의한 평균 수율을 계산할 수 있다.

수율의 최대화를 하기 위해서는 매 프레임마다 $p_t^{success}$가 최대화되어야 하며, $p_t^{success}$를 최대화하기 위한 p_t^{access}와 n_t^{SI}의 관계는 다음과 같다.

$$p_t^{access} = 1/n_t^{SI} \tag{13}$$

현재 제안된 ASO-TDMA는 홉 영역 내에 존재하는 선박의 수와 무관하게 p_t^{access}를 결정하기 때문에 시스템의 수율을 최대화할 수 없다. 따라서, p_t^{access}이 (12)로 유지하는 방식을 통해 수율의 최대화가 가능하다.

Ⅳ. 성능 분석

본 장에서는 III절의 수학적 분석 결과에 대한 정확성을 검증하기 위해 ASO-TDMA와 동일한 조건에서 시뮬레이션을 수행하여 수율 결과를 비교한다.

표 4. SO-TDMA 동작을 위한 변수
Table 4. Parameters for SO-TDMA

N_{total}	2250
c	0.1
TMO_MIN	3
TMO_MAX	8

ASO-TDMA는 기본적으로 SO-TDMA에서 사용하는 자원 획득 절차 및 설정 값을 대부분 그대로 사용하며, 이를 정리하면 표 4와 같다[5]. ASO-TDMA에서도 프레임의 크기는 $N_{total} = 2250$로 고정되어 있으나 ASO-TDMA는 전체 프레임을 다수의 부프레임으로 분할하여 영역에 따라 서로 다른 자원을 사용한다. 본 논문에서는 특정 홉 영역에 할당된 부프레임에 대한 수율을 확인하기 위해 부프레임의 크기를 $N_f = 375$로 설정하였다. 선박이 *SI*를 결정하기 위한 상수는 $c = 0.1$로 설정하고, time-out 값은 TMO_MIN과 TMO_MAX 사이에서 균일하게 선택되도록 설정하였다. 또한 *NSS*는 부프레임 내에서 균일한 확률분포로 슬롯을 선택하도록 설정하였고, *NTS*는 *SI*중에서 가용한 슬롯들 중에서 균일한 확률분포로 슬롯을 선택하도록 설정하였다.

그림 5 선박의 수와 전송률을 변화했을 때 정규화 된 수율 성능 결과를 보이며, 시뮬레이션 결과와 수학적 분석 결과가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 한편, 선박의 수가 적을 때는 채널자원이 여유가 있음에도 불구하고 사용하지 않는 상황이 발

www.dbpia.co.kr

생되어 낮은 수율 결과를 보인다. 반면에, 선박의 수가 채널의 허용가능 범위 이상 증가하게 되면 선박간 경쟁이 심화되어 수율이 감소하게 되므로, 선박의 수에 따라 수율을 최대화하기 위한 최적의 전송률이 존재하는 것을 확인할 수 있으며, 최적의 수율은 선박의 수와 전송률(s_{limit})에 따라 75~80%내에 존재함을 확인할 수 있다. 그림 6은 부프레임의 길이(N_f)와 선박의 수(n)가 주어졌을 때 s_{limit}에 따른 정규화된 수율 성능 결과를 보인다.

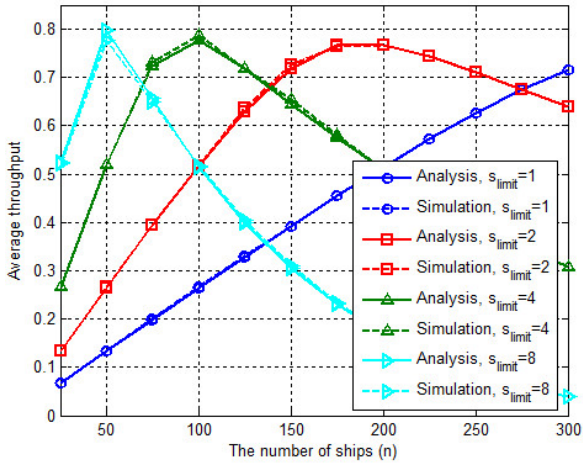

그림 5. 다양한 전송률에 대한 분석과 실험의 평균수율비교
Fig. 5. Average Throughput Comparison for Varying Transmission Rate

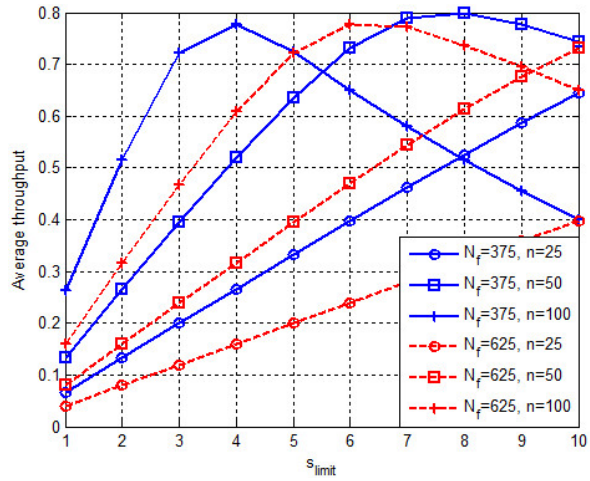

그림 6. 부프레임 크기와 전송률에 대한 평균 수율
Fig. 6. Average Throughput for varying subframe size and Transmission Rate

s_{limit}에 따라 홉 영역 내에서 발생되는 트래픽이 증가하므로 그림 5 결과와 마찬가지로 일정 이내의 범위까지는 수율이 증가하며, 일정한 부하를 넘어가면서 다시 수율이 감소하는 현상을 볼 수 있다. ASO-TDMA에서는 홉 영역별로 부프레임을 나누어 사용하기 때문에 홉 영역별로 발생되는 트래픽에 따라 부프레임 별로 적절한 부프레임 할당 방법이 필요하다. 그림 7은 timeout 범위의 변화에 따른 수율의 변화를 나타낸다. Timeout 값이 커지면 선박이 슬롯을 획득하기 위해 경쟁하는 횟수가 줄어들게 되므로 수율이 향상된다. 한편, timeout 값이 너무 크게 되면 각 선박이 한번 슬롯을 점유하면 경쟁없이 계속적으로 사용하는 불공정한 상황이 발생할 수 있게 된다. 하지만 이 결과는 현재 고려하는 full buffer 모델에 대해서만 국한된 것이며, 실제로 각 선박에서 지원해야 하는 트래픽에 따라서

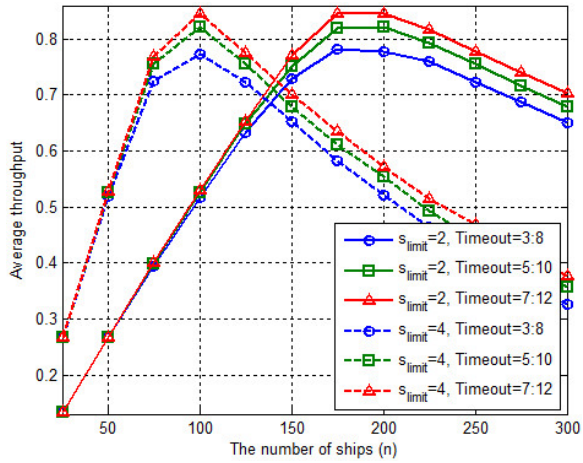

그림 7. Timeout 값에 대한 평균수율
Fig. 7. Average Throughput for varying Timeout Value

이 값이 결정되어야 할 것이다. 즉, s_{limit}과 timeout 값에 의해 개별 선박의 서비스 품질이 결정될 수 있으며, 특히 하나의 패킷이 2개의 프레임에 걸쳐 전송되어야 하는 경우에는 timeout 값에 의해 지연변이가 결정된다. 따라서, 개별 선박의 상이한 서비스 요구 사항에 따른 QoS를 지원하기 위해서는 s_{limit}와 timeout 값을 동적으로 제어할 수 있어야 하며, 이를 위한 별도의 연구가 필요하다.

V. 결 론

본 논문에서는 VHF 대역 해양통신망에서 데이터 통신을 지원하기 위해 새롭게 연구된 ASO-TDMA이 기존의 SO-TDMA에 비해 보완된 부분을 확인하였고, ASO-TDMA의 동작 절차에 대해 서술하였다. ASO-TDMA의 수율을 분석하기 위해 매 프레임 단위로 점유와 해제를 반복하는 슬롯의 수를 갱

www.dbpia.co.kr

신하여 프레임 천이 행렬을 만든 후 안정 상태에서 수율을 계산하였다. 수율을 최대화하기 위해서는 슬롯에 대한 선박의 전송확률을 선박의 수에 따라 조절해야 하지만 ASO-TDMA에서는 이를 반영하지 못하기 때문에 선박의 수에 따라 최적의 전송률이 존재하는 것을 확인하였다. 또한, ASO-TDMA의 수율은 슬롯의 예약 구간을 결정하는 timeout 값의 크기에 의해서도 달라질 수 있음을 확인하였고, 발생되는 트래픽의 QoS를 고려하여 수율을 최대화 시키는 timeout 값을 결정하는 방법에 대한 연구가 필요함을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] Recommendation ITU-R M.1842-1, Characteristics of VHF radio systems and equipment for the exchange of data and electronic mail in the maritime mobile service RR Appendix 18 channels.

[2] Y. B. Kim, K. H. Chang, C. H. Yun, J. W. Park, Y. K. Kim, “Application Scenarios of Nautical Ad-hoc Network in Wireless Mobile Communication under Maritime Environment,” *International J. of Info. and Comm. Eng.,* vol. 13, no. 10, pp.2097-2104, Oct 2009.

[3] Changho Yun and Yong-kon Lim, “Ad-hoc self organizing-TDMA (ASO-TDMA) MAC protocol for ship ad-hoc network (SANET)”, draft.

[4] B. Hui, K. H. Jeon, K. H. Chang, S. G. Kim, J. W. Park, Y. K. Lim, “Design of Radio Transmission Technologies for VHF Band Ship Ad-hoc Nework,” in *Proc. Int. Conf. on ICT Convergence 2011 (ICTC 2011)*, pp.626-629, Seoul, Korea, September 2011.

[5] Technical Clarifications of Recommendation ITU-R M.1371-2, “Technical characteristics for a universal shipborne automatic identification system using time division multiple access in the VHF maritime mobile band,”

[6] D. Gross, J. F. Shortle, J.M. Thompson, and C.M. Harris, “Fundamentals of Queueing Theory,” 4th Ed., Wiley, 2008.

조 구 민 (Kumin Cho)

2009년 8월 명지대학교 통신공학과 학사

2010년 3월~현재 고려대학교 전기전자전파공학과 석박사 통합과정

<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

<관심분야> Underwater Acoustic Network, Maritime shipborne nework, Broadband convergence Network (BcN), Next Generation Network (NGN), IP Multimedia Subsystem (IMS)

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

www.dbpia.co.kr