

Ad Hoc Self-Organizing (ASO) TDMA 방식 다중-홉 해양통신망에서의 실시간 전송 기법

조구민[°], 윤창호^{*}, 임용곤^{*}, 강충구^{**}

Real-Time Transmission Scheme for Ad Hoc Self-Organizing (ASO) TDMA in Multi-Hop Maritime Communication Network

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

요 약

본 논문은 VHF 대역을 사용하는 다중-홉 해양통신망에서 실시간 서비스를 제공하기 위해 제안된 DSTS (Dynamic Space-Time Subframe) 기반 프레임 구조에서 다수의 MAC PDU로 구성된 데이터를 ASO-TDMA 전송 방식을 사용했을 때 발생하는 지연시간의 분포를 수학적으로 분석하고, 그 성능을 시뮬레이션을 통해 확인한다. 또한, 기존 전송방식에서 발생하는 지연시간을 단축시키는 동시에 시스템의 수율을 최대화하기 위한 연속적인 자원 할당 방식과 적응적 전송 확률 제어 방식을 제안하고, 기존 방식과 수율 성능을 비교한다. 이를 통해 본 논문에서 제안하는 방식은 DSTS 프레임 구조에서 다수의 MAC PDU에 대해서도 실시간 전송이 가능하고, 또한 수율 성능을 극대화할 수 있음을 보인다.

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

ABSTRACT

In this paper, we first analyze the delay performance of Dynamic Space-time Subframe (DSTS)-based frame structure which has been proposed to support the real-time service as well as non real-time service, using Ad hoc Self-Organizing Time Division Multiple Access (ASO-TDMA) MAC protocol, especially when transmitting a MAC SDU with two or more MAC PDUs, in a multi-hop ad-hoc maritime communication network. We propose two key transmission schemes: contiguous DSTS reservation which guarantees the end-to-end delay for the multiple PDUs, and adaptive transmission probability control schemes to maximize the system throughput. Our simulation results show that the proposed schemes outperform the system throughput of the existing transmission schemes, while supporting the real-time requirement.

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

◆[°] First Author and Corresponding Author : Korea University School of Electrical Engineering, kumin84@korea.ac.kr, 학생회원

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

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

논문번호 : KICS2014-04-110, Received April 1, 2014; Revised April 21, 2014; Accepted May 12, 2014

I. 서 론

VHF 대역을 이용한 해상 데이터 통신의 수요가 증가함에 따라 ITU-R에서는 M. 1842-1을 통해 데이터 통신을 위한 새로운 통신시스템에 대한 권고사항이 제시되었다. VHF 대역 데이터 통신망은 Automatic Identification System (AIS)와 호환성을 유지할 것을 권고하였으며, PHY 및 MAC 계층 파라미터들의 조합을 통한 4가지 데이터 통신 시스템에 대한 예시를 보였다^[1]. 30km 내외의 통신 커버리지를 갖는 VHF 해양통신망에서 육상기지국과 선박 간에 연결성을 보장하기 위한 선박간 애드혹 네트워크(Ship Ad-hoc NETwork: SANET)에 대한 연구가 진행되고 있으며, [2-3]에서는 기존 통신시스템과의 호환성을 유지하는 SANET을 구성하기 위해 AIS에서 사용되는 MAC 프로토콜인 Self Organizing TDMA (SO-TDMA)를 다중-홉 데이터 통신이 가능하도록 변형한 애드혹 자율 구성 TDMA (ad-hoc self-organizing-TDMA: ASO-TDMA) 방식의 MAC 프로토콜이 제시되었다.

ASO-TDMA에서는 각 선박은 자신의 위치를 기준으로 육상 기지국과의 거리를 계산하고, 해당 거리를 VHF 대역 커버리지로 나누어 육상 기지국에 도달하기 위한 홉 수를 계산한다. 계산된 홉 수에 따라 ASO-TDMA 프레임에서 자신이 사용할 자원의 위치를 파악한 후에 자신과 동일한 홉 영역에 존재하는 선박들과 경쟁을 통해 자원을 획득하여 데이터를 전송한다^[4,5].

ASO-TDMA 전송방식을 사용하는 선박들은 자신의 물리적 위치에 따라 정해진 자원을 사용하는 방식을 사용하였기 때문에, 특정 홉 영역에서 발생될 수 있는 병목현상과 경쟁의 심화로 인한 수율 저하 문제를 해결하기 위해 홉 영역간 부하 균형 수율 최대화를 위한 적응적 부프레임 할당 및 전송률 제어 방법에 대한 연구가 진행되었다^[6]. 한편, 60초의 길이를 갖는 ASO-TDMA 프레임 구조는 매우 큰 종단간의 지연시간을 유발하기 때문에, 실시간 사용자들이 원하는 수준의 종단간 지연시간과 전송률을 보장하기 위한 DSTS (Dynamic Space-Time Subframe) 기반의 프레임 구조가 제안되었다^[7]. 제안된 프레임 구조는 실시간 및 비실시간 사용자가 사용하는 자원영역을 분할하고, 시간에 따라 변화하는 실시간 사용자의 부하에 따라 실시간 자원의 크기를 가변적으로 조절할 수 있도록 설계되어 실시간 사용자의 전송률과 지연시간의 관점에서 서비스 품질을 보장할 수 있었다. 그러나 [7]의 방식은 단일 MAC PDU의 관점에서 지연시간을

보장하는 방식이기 때문에 다수의 MAC PDU로 구성된 MAC SDU에 대해서는 지연시간 성능을 보장할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 이러한 지연시간의 문제점을 해결하면서 수율을 최대화하는 전송방식을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 ASO-TDMA 전송방식과 DSTS 프레임 구조를 설명하고, 3장에서는 DSTS 프레임 구조에서 ASO-TDMA 방식을 통해 전송했을 때 발생하는 지연시간에 대한 수학적으로 분석과 이에 따른 문제점을 다룬다. 4장에서는 3장에서 논의된 문제점을 해결하는 동시에 시스템 수율을 향상시키는 전송방식을 제안하고, 5장에서는 제안된 전송방식을 비롯한 다양한 비교 대상의 시스템 수율 성능을 비교한 후에 마지막으로 6장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 배경 설명

2.1 다중-홉 통신을 지원하기 위한 ASO-TDMA

ASO-TDMA는 다중-홉 데이터 통신을 수행할 때 해상안전을 위한 통신망인 AIS 시스템과 호환성을 유지하기 위해 AIS와 유사한 프레임 구조 및 다중접속 방식을 사용한다. AIS는 1분을 기본 단위로 하는 프레임을 정의하며, 하나의 프레임은 2250개의 시분할 슬롯으로 구성된다^[8]. AIS 선박들은 각 프레임에 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, ASO-TDMA는 SO-TDMA를 기반으로 다중-홉 통신을 지원하기 위해 제안된 프로토콜이다.

SO-TDMA는 선박이 주기적으로 자신의 위치 및 방향 정보를 주변에 알릴 때 사용되는 MAC 프로토콜로서, 트래픽이 주기적으로 발생하는 특성 때문에 한번 자원을 획득하면 다수의 주기에 걸쳐 경쟁 없이 사용이 가능한 예약기능이 존재한다. 따라서 네트워크에 처음 진입하는 선박이 이미 예약된 자원에 전송을 시도하지 않도록 하기 위해, 우선 한 프레임 동안 슬롯의 사용정보를 파악한 후에 가용한 슬롯에 전송을 시도하도록 설계되었다.

AIS는 선박의 상대나 운항속도에 따라 데이터의 전송주기가 결정된다. 이 데이터의 전송주기에 따라 각 프레임에서 전송할 수 있는 기회의 수가 s_{limit} 로 주어지며, 이 값에 따라 전송률이 결정된다. 선박은 주어진 전송률에 따라 전송을 시도할 때, 다른 선박이

전송한 데이터와 충돌이 일어날 확률을 낮추기 위해 정해진 주기를 기준으로 전송을 시도하는 슬롯의 위치를 랜덤하게 결정한다. 그림 1에서 보는 바와 같이 각 선박은 임의의 한 슬롯을 기준 슬롯(Nominal Start Slot: NSS)으로 선택하고, 주어진 전송률에 따라 전송 간격(Nominal Increment: NI)을 $NI = 2250/s_{limit}$ 로 설정한 후에 NSS를 기준으로 NI 주기마다 떨어진 슬롯을 Nominal Slot (NS)으로 설정하고 전송을 시도한다. 이때 NSS와 NI가 동일한 선박들이 존재한다면 모든 전송에서 데이터 충돌이 일어나기 때문에 SO-TDMA는 NSS 또는 NS를 중심으로 다음과 같이 전송가능 범위(Selection Interval: SI)로 설정하고 SI범위 내에서 랜덤하게 Nominal Transmission Slot (NTS)를 선택하여 전송하도록 설계되었다.

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

여기서, c 는 SI의 범위를 결정하기 위한 상수로서 $c \leq 1$ 이며, SO-TDMA에서는 $c = 0.1$ 로 사용되었다. 이 과정에서 데이터의 충돌 없이 전송에 성공한 슬롯은 3과 8사이에서 랜덤하게 결정된 timeout에 해당하는 프레임동안 선박에게 예약되어 다른 선박의 전송 시도 없이 독점적으로 사용할 수 있다. SO-TDMA에서는 timeout의 최소 값(TO_{min})과 최대 값(TO_{max})을 각각 3과 8로 설정해 두었으며, timeout은 수율 성능에 영향을 미치는 변수이므로 시스템의 특성에 따라 다르게 구현될 수 있다. 각 선박은 위의 과정을 통해 예약에 성공한 슬롯에 전송을 시도할 때마다 timeout값을 1씩 감소시키며, 해당 슬롯의 timeout 값이 0이 되면 슬롯의 사용을 중단하고 자신의 SI범위 내에 가능한 슬롯 중에 하나를 또 다시 선택하여 전송을 시도한다.

ASO-TDMA는 다중-홉 통신이 발생될 수 있는 hidden node 문제(hidden node problem)를 해결하기 위해 그림 2와 같이 하나의 SO-TDMA 프레임을 다수 개의 부프레임으로 분할하고, 선박의 위치에 따라 서로 다른 자원을 할당하는 방식을 사용한다^[5]. ASO-TDMA에서 각 선박은 GPS를 이용하여 육상기

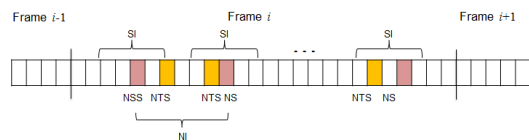


그림 1. SO-TDMA 프레임 구조
Fig. 1. SO-TDMA frame structure

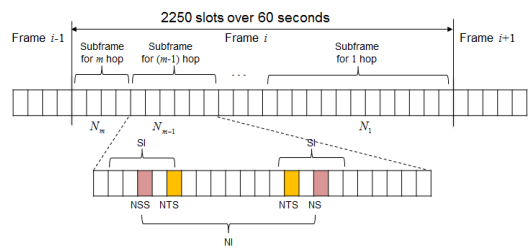


그림 2. ASO-TDMA 프레임 구조
Fig. 2. ASO-TDMA Frame structure

지국과 자신의 직선거리를 계산하고, 해당 거리를 VHF대역 커버리지로 나누어 육상 기지국에 도달하기 위한 홉 수를 계산하여 미리 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 계산된다.

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

2.2 실시간 통합 서비스를 위한 DSTS기반 프레임 구조

프레임을 3개의 부프레임으로 분할하여 공간적으로 자원을 재사용하는 ASO-TDMA 방식에서는 중단 간에 메시지를 주고 받는데 최소 1개 프레임 60초 이상의 지연시간이 발생하며, 경로상의 노드들이 데이터를 전달하기 위한 자원을 획득하지 못하는 경우에는 더 많은 지연시간이 발생되므로 실시간 서비스를 지원하는데 한계가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 프레임을 다수의 Dynamic Space-time Subframe (DSTS)로 분할하여 실시간 데이터 패킷의 중단간 지연시간을 단축시키고, 라우팅 경로상의 노드들이 데이터 전달을 위해 경쟁하는 홉수를 감소시키는 프레임 구조가 제안되었다^[7].

각 홉 영역에는 실시간(real-time: RT) 서비스와 비실시간(non-real-time: NRT) 서비스를 요청하는 선박이 공존한다고 가정한다. DSTS는 실시간 서비스를 지원하기 위한 N 개의 실시간 슬롯들과 비실시간 서비스를 지원하기 위한 M 개의 비실시간 슬롯들로 구성된다. DSTS의 실시간 슬롯들은 각 홉 영역 별로 하나씩 예약이 된다. 즉, 라우팅 알고리즘에 의해 중단

간 선박의 경로가 미리 정해져 있고, 각 선박은 경로 상에서 몇 번째 홉-영역에 속하는지 알고 있다고 가정 하자. 이때, 각 선박이 속하는 홉 영역을 결정하는 방법은 기존 ASO-TDMA와 동일하게 GPS에 기반한 홉 영역 추정과정을 따른다. 경로 상에서 출발지 노드가 n 번째 (또는 $N \times k + n$ 번째 홉 영역; $k=1,2,\dots$)에 속하면, 각 DSTS의 n 번째 RT 슬롯을 획득하기 위해 경쟁을 한다. 출발지 노드에 의해 RT 슬롯이 획득되면, 경로 상의 그 다음 홉 영역들에 있는 중계 노드들은 별도의 경쟁 없이 해당 DSTS의 RT 슬롯들을 사용할 수 있도록 예약된다.

그림 3은 3개의 홉 영역에 걸친 경로에 대해서 실시간 서비스 선박의 종단간 전송 과정을 예시하고 있다. DSTS를 구성하는 실시간 및 비실시간 슬롯의 수는 각각 $N=3$ 와 $M=3$ 이며, 경로가 육상으로부터 3번째 홉 영역에서 출발한다고 가정하자. 이 홉 영역에서 RT 슬롯 #3을 획득하면 경로상의 2 번째와 1 번째 홉 영역들에 있는 중계 선박들이 각각 RT 슬롯 #2와 RT 슬롯 #1를 경쟁하지 않고 사용할 수 있도록 연속적으로 예약함으로써 종단간에 지연 없이 전송이 가능하도록 한다. 즉, 경로 상에서 홉 영역 3의 선박이 RT 슬롯 #3에서 전송하면 경로 상의 홉 영역 2에 있는 선박이 이 슬롯에서 수신함으로써 홉 영역 3과 홉 영역 2간의 중계가 이루어진다. 홉 영역 2의 중계 선박은 이를 다시 RT 슬롯 #2에서 바로 전송하고, 이를 홉 영역 1의 선박이 수신함으로써 중계가 수행된다. 마지막으로 RT 슬롯 #1에서 동일한 중계 절차를 수행함으로써 종단간에 지연 없이 전송이 가능해지게 된다.

동일한 홉 영역에 존재하는 실시간 선박들간에 자원 획득 방법은 ASO-TDMA 프로토콜과 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.

DSTS에서 4로 표시된 슬롯들은 비실시간 사용자를 위한 슬롯을 나타내며, NRT 슬롯들을 가상적으로 연결하여 ASO-TDMA프레임을 구성한 후에 각 홉 영역 별로 직교적으로 할당하게 된다. 비실시간 사용자들은 자신의 홉 영역에 할당된 NRT 슬롯들에 대해 기존의 ASO-TDMA 전송방식으로 데이터를 전송한다. 만약 선박이 실시간 및 비실시간 트래픽을 동시에 전송해야 한다면 실시간 트래픽은 DSTS의 RT 슬롯을 통해 전송하고, 비실시간 트래픽은 DSTS의 NRT 자원을 통해 전송한다. 실시간 전송은 비실시간 자원에서 라우팅 경로를 설정한 후에 이루어지며, 기존에 연구된 다양한 라우팅 알고리즘이 경로 설정을 위해 사용될 수 있다.

III. ASO-TDMA 전송방식의 지연 성능 분석

[7]에서 제안된 프레임 구조는 선박이 DSTS단위로 자원을 예약하여 전송하는 방식이며, DSTS 단위로 단일의 MAC PDU (Protocol Data Unit)에 대해서 종단간 자원을 보장할 수 있다. 그러나 실제로 MAC SDU (Service Data Unit)가 다수의 MAC PDU로 구성되는 경우에는, 각 MAC PDU 단위로 ASO-TDMA에 의한 경쟁을 통해 DSTS를 획득해야 하므로 종단간 지연 시간을 보장할 수 없다. 본 장에서는 이와 같이 다수의 MAC PDU로 구성된 MAC SDU에 대해서 종단간 전송 지연 시간을 분석하고자 한다.

송신단이 N_{SDU} 개의 MAC PDU로 구성된 MAC SDU를 수신단에게 전송할 때 k 번 만에 모든 MAC PDU를 전송할 확률은 다음과 같이 파스칼 분포 (Pascal distribution)로 나타낼 수 있으며,

$$p_k = \binom{k-1}{N_{SDU}} (p_{success}^{TX})^{N_{SDU}} (1 - p_{success}^{TX})^{k - N_{SDU}} \quad (3)$$

여기서 $p_{success}^{TX}$ 는 송신단의 전송 성공 확률을 나타내며, [6]의 수열 분석과 유사하게 계산이 가능하다. [6]은 슬롯을 기준으로 슬롯의 예약상태와 선박의 전송 성공률을 통해 자원의 평균 사용률을 계산하는 반면에, 본 논문에서는 송신단의 자원 예약상태와 전송을 시도할 때 성공확률을 통해 선박의 평균 전송 성공 확률을 계산한다.

ASO-TDMA는 한번 전송에 성공하면, timeout구

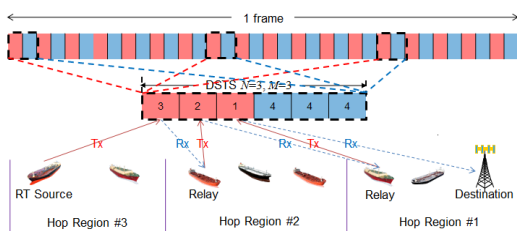


그림 3. DSTS 기반 프레임 구조의 예시
Fig. 3. Illustration for DSTS-based frame structure

간동안 이 자원의 예약이 보장된다. 따라서 프레임 t 에서 선박의 자원 예약 횟수와 예약 횟수의 변화를 각각 상태 벡터 $\vec{p}(t)$ 와 상태 전이확률 $M_{t,t+1}$ 을 구성요소로 하는 Markov chain으로 모델링할 수 있으며, 송신단의 전송 성공확률을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_{success}^{TX} = \pi v = \vec{p}(1) \prod_{t=1}^{t_{\infty}} M_{t,t+1} v \quad (4)$$

여기서, $\vec{\pi}$ 는 안정상태에서 선박의 자원 예약 횟수에 대한 확률 밀도로서, $\vec{\pi} = [\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{T_{Omax}}]$ 이다 ($\sum_{\pi_i \in \pi} \pi_i = 1$). 한편, t_{∞} 와 \vec{v} 는 각각 안정 상태에도 달하기 위해 필요한 프레임의 수와 선박의 자원 예약 횟수에 대한 전송의 성공확률을 나타낸다. 안정 상태에서 예약한 자원이 없는 선박은 안정상태의 전송 성공확률 $\pi^{success}$ 만큼 전송에 성공하고, 예약한 자원이 있는 선박은 1의 확률로 전송에 성공하므로 $\vec{v} = [\pi^{success}, 1, \dots, 1]^T$ 로 나타낼 수 있다. 또한 초기 상태에서 선박이 자원을 예약하고 있을 확률은 0이므로 $\vec{p}(1) = [1, 0, 0, \dots, 0]$ 이다. 선박의 예약상태 변화를 나타내는 상태전이 행렬 $M_{t,t+1}$ 은 다음과 같이 주어지며,

$$M_{t,t+1} = \begin{bmatrix} m_{0,0}^{(t)} & m_{0,1}^{(t)} & \dots & m_{0,K-1}^{(t)} \\ m_{1,0}^{(t)} & m_{1,1}^{(t)} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \\ m_{K-1,0}^{(t)} & \dots & & m_{K-1,K-1}^{(t)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$M_{t,t+1}$ 을 구성하는 원소 $m_{i,j}^{(t)}$ 는 번째 프레임에서 timeout 값이 i 인 슬롯이 $(t+1)$ 번째 프레임에서 timeout 값이 j 가 될 확률로 정의하며, t 번째 프레임에서 특정 슬롯의 timeout 값을 $r(t)$ 라고 하면 $m_{i,j}^{(t)}$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$m_{i,j}^{(t)} = \Pr(r(t+1) = j | r(t) = i) = \begin{cases} 1 - p_t^{success} (1 - p_1), & i = 0, j = 0 \\ p_{j+1} p_t^{success}, & i = 0, j \neq 0 \\ 1, & i = j + 1 \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (6)$$

여기서 $p_t^{success}$ 와 p_K 는 각각 t 번째 프레임에서 선박의 전송이 성공할 확률과 전송에 성공한 선박의 예약

횟수가 K 일 확률을 나타낸다($\sum_{\forall k} p_k = 1$). 선박의 수 n_t^{SI} 와 선박의 전송확률 $p_t^{success}$ 가 주어졌을 때 $p_t^{success}$ 는 자신을 제외한 모든 선박이 전송을 시도하지 않을 확률이므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_t^{success} = (1 - p_t^{success})^{n_t^{SI} - 1} \quad (7)$$

만약 선박이 SI범위 내에서 가용한 슬롯을 선택하여 전송을 시도할 때 균일한 확률분포로 슬롯을 선택한다면 $p_t^{success}$ 는 t 번째 프레임에서 선박의 SI범위 내에 가용한 슬롯의 수 N_t^{SI} 의 역수가 된다(즉, $p_t^{success} = 1/N_t^{SI}$). N_t^{SI} 는 t 번째 프레임에서 슬롯을 점유하는 선박의 수 $O(t)$ 와 슬롯의 사용을 해제하는 선박의 수 $R(t)$ 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있으며,

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

경쟁에 참여하는 선박 수의 변화량은 가용한 슬롯 수의 변화량과 동일하므로 t 번째 프레임에서 경쟁에 참여하는 선박의 수 n_t^{SI} 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

$O(t)$ 와 $R(t)$ 는 ASO-TDMA의 예약 방식에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

(7)~(11)는 초기 값을 기준으로 반복적으로 계산하여 도출할 수 있다. n 척의 선박이 존재하는 홈 영역에 N_f 개의 슬롯으로 구성된 부프레임이 할당되었다고 가정하자. 선박의 NSS가 고르게 분포되었다고 가정하면, 첫 번째 프레임의 특정 슬롯에 전송을 시도할 수 있는 선박의 수 n_1^{SI} 는 다음과 같이 계산 할 수 있다.

$$n_1^{SI} = n(2cN_f + s_{limit})/N_f \quad (12)$$

선박이 SI범위 내에서 가용한 슬롯을 선택하여 전송을 시도할 때 균일한 확률분포로 슬롯을 선택한다면 첫 번째 프레임에서 특정 슬롯에 대한 선박의 전송 확률 p_1^{access} 은 다음과 같다.

$$p_1^{access} = 1/N_t^{SI} = (2cN_f + 1) \quad (13)$$

주어진 초기 값을 이용하여 각 프레임의 $p_t^{success}$ 를 갱신하고, $\bar{\pi}$ 와 $\pi^{success}$ 를 계산한 뒤에 식 (4)를 이용하여 $p_{success}^{TX}$ 를 계산함으로써 선박의 전송 지연시간에 대한 분포를 확인할 수 있다.

그림 4와 5는 균일한 분포로 홉 영역 3에 존재하는 50척의 선박이 375개의 DSTS로 구성된 프레임에서 ASO-TDMA 방식으로 데이터를 전송할 때, MAC SDU의 크기와 선박의 전송률에 따른 지연시간을 보이는 그래프이다. 선박의 전송률에 따라 전송간격(NI)이 다르기 때문에 명확한 비교를 위해

마지막 MAC PDU를 보내기까지 걸린 DSTS의 개수를 NI로 나누어 정규화하였다. VHF 대역 다중-홉 해양통신망의 시물레이션을 위해 [1]의 annex 4에 제시된 물리계층 파라미터와 [4]에 제시된 경로 감쇄, 페이딩, 채널 코딩 등 사용하여 링크레벨 시물레이션을 수행하였고, 구체적인 파라미터는 표 1에 정리하였다. 시스템 레벨 시물레이션을 구현하기 위한 파라미터는 [8]과 [9]를 참조하였으며, 표 2에 정리하였다.

그림 4와 5에서 보는 바와 같이 MAC SDU의 크기 (N_{SDU})가 클수록 지연 시간이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 각 MAC PDU가 개별적으로 경쟁을 통해 채널을 획득해야 하기 때문에 MAC PDU의 수가 증가함에 따라 지연 시간이 비례적으로 증가한다. 한편, 그림 6은 MAC SDU의 크기와 선박의 전송률에 따라 발생하는 지연 시간을 계산한 것이다. s_{limit} 에

표 1. 물리계층 파라미터
Table 1. Physical layer parameters

Frequency band	160MHz
Bandwidth	100kHz
Tx power	25 watts
Subcarriers	32
Channel coding (rate)	Convolutional code (1/2)
Modulation	16-QAM
Pathloss model	Free space
Fading model	Rician (K=17dB)

표 2. MAC 계층 파라미터
Table 2. MAC layer parameters

Common	
Slots per frame	2250
DSTSs per frame	375
The number of RT slots in a DSTS	3
The number of RT slots in a DSTS	3
Ships per hop	50
Traffic model	Full buffer
Routing	AODV
ASO-TDMA	
c	0.1
TO_MIN	3
TO_MAX	8

의해 선박의 전송률이 증가하면 전송 기회가 증가하므로 지연 시간이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 선박의 전송률이 증가하면 지연 시간이 비례하게 줄어야 하나, 전송률에 따라 선박의 전송 성공 확률이 달라지기 때문에 지연 시간이 정확하게 비례해서 늘지는 않는다. 예를 들어, $s_{limit} = 4$ 에서 $s_{limit} = 8$ 으로 전송률이 증가하게 되면 시스템이 과부하 상태가 되어 선박의 전송 성공 확률이 낮아지게 되어 MAC SDU의 크기에 해당하는 전송 시도보다 더 많은 전송 시도가 필요하게 된다.

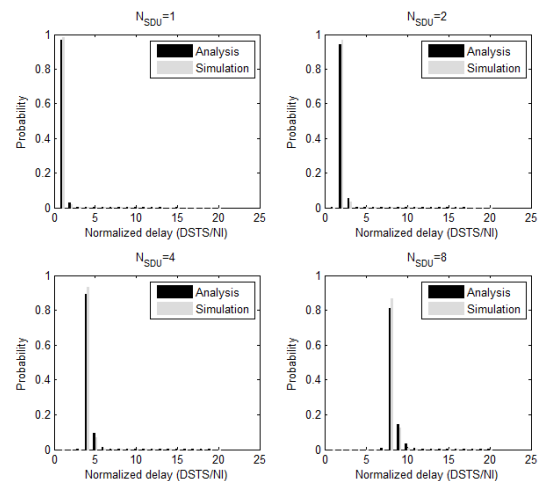


그림 4. MAC SDU를 구성하는 MAC PDU의 수에 따른 정규화된 지연시간 분포: $s_{limit} = 4$
Fig. 4. Distribution of normalized delay for varying the number of MAC PDU: $s_{limit} = 4$

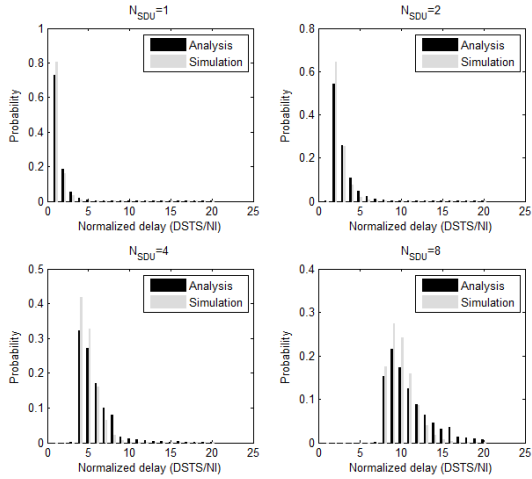


그림 5. MAC SDU를 구성하는 MAC PDU의 수에 따른 정규화된 지연시간 분포: $s_{limit} = 4$
 Fig. 5. Distribution of normalized delay for varying the number of MAC PDU: $s_{limit} = 8$

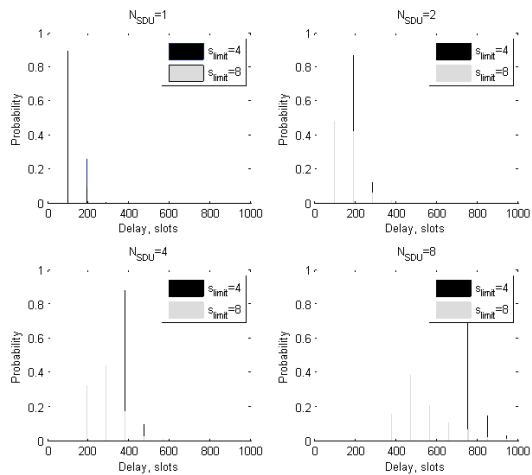


그림 6. MAC SDU를 구성하는 MAC PDU의 수와 전송률에 따른 지연시간 분포
 Fig. 6. Delay distribution for varying the number of MAC PDU and transmission rate

지연시간이 MAC SDU의 크기에 따라 전송 실패에 따른 수학적 분석과 시뮬레이션이 완벽하게 일치하지 않는 이유는 선박이 NSS와 NTS를 선택할 때 랜덤하게 선택하기 때문에 전송간격이 실제로는 균일하지 않으며, 결과적으로 수학적 분석은 비슷한 양상을 보이나 일부 차이가 있음을 확인할 수 있다(소수점을 갖는 실험값은 반올림하였음).

IV. 다중 MAC PDU의 전송 지연 성능 보장을 위한 전송 방식

4.1 실시간 지연 성능 보장을 전송 방식

다수의 MAC PDU로 구성된 MAC SDU를 ASO-TDMA 방식으로 전송하는 경우에는 그림 3에서 보는 바와 같이 모든 전송이 데이터 충돌 없이 성공적으로 전송되더라도 DSTS가 1분간의 프레임에 걸려서 있기 때문에 연속된 MAC PDU를 모두 전송하기 위해서는 상당한 지연 시간이 불가피하다. 특히, 시스템이 과부하 상태일 때는 MAC PDU 단위로 슬롯 획득을 위한 경쟁에서 전송 성공 확률이 감소하여 다수의 MAC PDU를 모두 전송하기 위해서는 추가적인 지연을 겪게 될 것이다. 본 절에서는 다수의 MAC PDU로 구성된 MAC SDU를 전송할 때 지연시간을 감소시키는 방안으로서, 이들 연속된 MAC PDU에 대해 자원 예약이 가능한 전송 구조를 제시한다.

제안하는 전송방식은 빈 슬롯이 발생했을 때 선박이 랜덤 확률로 전송을 시도하며, 전송을 시도한 DSTS에서 전송이 성공으로 확인되는 경우에 해당 프레임의 DSTS들을 연속적으로 사용할 수 있도록 설계되었다. 그림 7은 그림 3과 같이 $N = 3$ 과 $M = 3$ 의 DSTS를 사용하는 예시이며, 제안하는 방식에서는 3개의 DSTS를 연속해서 예약 가능하도록 한 것이다. 연속적인 데이터 전송이 끝나고 슬롯이 유휴상태가 될 것임을 동일 홉 영역에 존재하는 선박들에게 알리기 위해서, 전송하는 프레임에 전송의 종료여부를 알리는 1비트의 end flag를 사용한다. 예를 들어, 초기 전송에 성공하여 연속적으로

데이터를 전송하는 선박이 자신의 전송 기회를 모두 사용하거나 또는 버퍼에 있는 데이터를 모두 소진한 경우에 마지막 데이터의 헤더에 있는 end flag를 1로 채워서 전송하면, 대기하는 선박이 다음 슬롯에서 채널이 유휴상태가 됨을 알 수 있다. 채널의 유휴상태를 감지한 모든 선박들이 전송을 시도하면 데이터 총

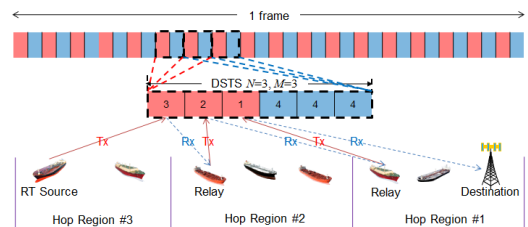


그림 7. 제안하는 프레임 구조의 예시
 Fig. 7. Illustration for the proposed frame structure

돌이 일어나 시스템 수율 성능의 저하가 발생된다. 이와 같이 연속된 DSTS의 예약을 통해 지연시간을 감소시키는 동시에 시스템의 수율을 최대화 하기 위해 채널의 유휴 상태를 감지한 선박의 전송 시도 확률을 적응적으로 조절하는 방법을 사용하며, 구체적인 방법은 다음 절에서 설명한다.

4.2 수율 극대화 방안

시스템 수율의 최대화는 슬롯의 관점에서 각 슬롯이 선박에 의해 점유할 확률을 최대화함으로써 얻을 수 있다. 만약 n 척의 선박이 p^{access} 의 확률로 전송을 시도한다고 가정했을 때, 임의의 슬롯이 하나의 선박에게 점유될 확률 $p^{success}$ 은 다음과 같으며,

$$p^{success} = \binom{n}{1} p^{access} (1 - p^{access})^{n-1} \quad (14)$$

(14)식을 최대화하는 $p^{access} = 1/n$ 을 전송 시도 확률로 설정할 수 있으며, 이를 위해 선박의 수를 정확하게 알아야 한다. 본 논문에서 고려하는 애드혹 해양통신 망은 30km단위로 홉 영역을 나누어 홉 영역별로 독립적인 자원을 사용한다. 이때 홉 영역을 이동하는 선박의 속도가 매우 낮아 자원획득을 위해 경쟁하는 선박의 수가 빠르게 변화하지 않기 때문에, 육상기지국 또는 클러스터링을 통해 선출된 대표 노드가 홉 영역에 존재하는 선박의 수를 주기적으로 알려주면 채널 자원을 효율적으로 사용할 수 있다.

한편 프레임이 시작하는 시점에서는 모든 선박들이 자신의 전송률에 해당하는 자원을 전송하고자하기 때문에 경쟁이 심화되나, 채널을 점유하여 데이터를 소진한 선박은 해당 프레임에서 경쟁에 참여하지 않기 때문에 남은 선박들은 이를 반영해야 채널의 불필요한 유휴시간을 줄일 수 있다. 따라서 제안하는 방식은 프레임의 시작점에서는 육상기지국 또는 대표 노드가 알려준 선박의 수 n 를 기반으로 전송확률을 $p_t^{access} = 1/n$ 로 설정하여 전송을 시도하며, 전송이 끝난 선박이 발생하면 순차적으로 n 을 감소시켜 전송 확률을 갱신할 수 있다.

V. 성능 분석

본 장에서는 DSTS기반의 프레임 구조에서 제안하는 방식의 수율 성능을 분석하고자 하며, 이 결과를 ASO-TDMA와 랜덤 백오프(random backoff) 방식의 성능과 비교한다. Random backoff와 제안하는 전송

방식은 선박의 전송이 끝나고 채널이 유휴 상태가 되었을 때 선박들의 전송 시도가 집중되는 현상을 방지하기 위해 랜덤하게 결정된 시간을 대기한 후에 전송한다는 점에서 공통점을 갖는다. Random backoff 방식에서는 contention window라고 설정된 시간 범위 내에서 랜덤하게 선택된다. 이때 데이터 충돌이 일어날 때마다 contention window의 크기를 2배로 증가시켜 데이터 충돌을 예방하는 exponential random backoff 방식을 적용하며, 이러한 방식은 IEEE 802.11 무선 LAN 규격에서 적용되고 있다. 해당 방식은 전송을 시도하는 경쟁자의 수를 직접적으로 알지 못할 때 데이터 충돌을 통해 적응적으로 contention window의 사이즈를 조절하여 선박의 전송 확률을 결정하는 방식이다. 반면에 제안하는 방식은 육상기지국 또는 클러스터의 대표 노드가 홉 영역에 존재하는 경쟁자의 수를 직접적으로 알려줌으로써 수학적 분석에 기초한 수율 최대화가 가능하다.

시뮬레이션을 위한 파라미터는 표 1과 2를 따르며, Random backoff 방식에서 사용할 contention window 크기의 최소 값과 최대 값은 각각 $CW_{min} = 2^5 - 1$ 과 $CW_{max} = 2^{10} - 1$ 으로 설정하였다. ASO-TDMA에서는 전송률이 결정되면 SI의 크기를 결정하기 위한 c 와 자원 예약을 위한 timeout의 최소 값과 최대 값의 조합(T_{Omin}, T_{Omax})이 필요하며, 현재 AIS에서 사용되고 있는 값을 적용하였다. 본 논문에서 고려하고 있는 프레임 구조는 동기식 TDMA 구조이므로 random backoff 절차 및 Contention window 생성을

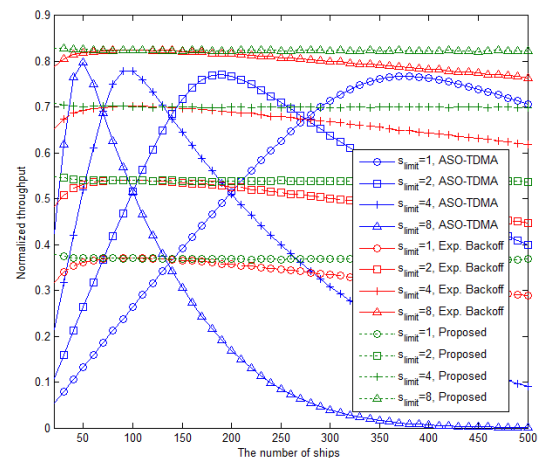


그림 8. 전송률 별로 선박 수의 변화에 따른 시스템 수율 성능: 전송 방식별 비교
Fig. 8. Normalized throughput vs. the number of ships for varying the transmission rate: comparison

위한 파라미터를 참조하였다. 최초의 Contention window의 크기는 $[1 : CW_{min}]$ 의 범위에서 선택하며, 데이터 충돌이 일어난 경우에 window의 사이즈를 두 배로 증가시켰다. 데이터 충돌로 인해 window의 크기가 늘어나더라도 선택 범위가 $[1 : CW_{max}]$ 을 넘지 않도록 설정하였다.

그림 8에서는 균일한 분포로 홉 영역 3에 존재하는 50척의 선박이 375개의 DSTS로 구성된 프레임에서 전송방식과 전송률에 따른 시스템 수율 성능을 비교하는 그래프를 보인다. ASO-TDMA는 선박의 수가 변화하였을 때 데이터의 전송 확률을 변화시키지 못하기 때문에 수율 성능이 볼록 함수(convex function)의 형태를 띄고 있음을 확인할 수 있으며, 반면에 제안하는 방식은 선박 수의 변화에 따라 데이터의 전송 확률을 적절히 변화시킴으로써 거의 일정한 수율 성능을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 한편, random backoff 방식은 ASO-TDMA에 비해 양호한 성능을 보이나 선박의 수가 200이상이 되면, 수율 성능이 감소함을 확인할 수 있다. Random backoff 방식은 일정한 범위 내에서 동작하는 contention window를 만들기 때문에 선박의 수가 많거나 적을 때 적응적으로 대처하기 어렵다.

그림 9는 위와 동일한 시뮬레이션 환경에서 $s_{limit} = 8$ 로 고정된 상태에서 CW_{min} 과 CW_{max} 을 변화시키며 시스템 수율 성능을 비교한다. [8]에 정의된 파라미터 ($2^5 - 1, 2^{10} - 1$)는 200이하의 구간에서만 좋은 수율 성능을 보이지만, 제안하는 방식은 전

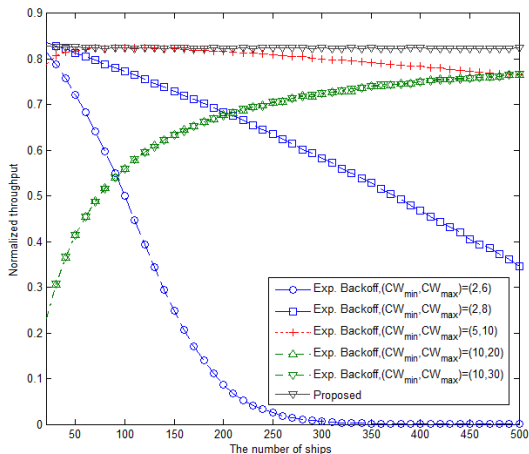


그림 9. Contention window 크기의 변화에 따른 수율 성능 비교
 Fig. 9. Throughput comparison for varying a size of contention window

구간에서 높은 수율 성능을 유지하고 있음을 확인할 수 있다.

VI. 결 론

현재 다중 홉 해양통신망에서 고려되고 있는 ASO-TDMA의 지연시간 단축을 위해 DSTS기반의 프레임 구조가 제안되었다. 제안된 프레임 구조는 단일 MAC PDU의 관점에서 지연시간을 크게 감소시킬 수 있었으나 다수의 MAC PDU로 구성된 MAC SDU의 지연시간은 단축시키지 못하였다. 본 논문에서는 DSTS 기반의 프레임 구조에서 ASO-TDMA 전송방식이 갖는 문제점을 해결하기 위해 연속적인 데이터 전송 및 적응적 전송확률 제어 방식을 제안하고 성능을 확인하였다. 객관적인 성능 비교를 위해 ASO-TDMA와 random backoff 방식에 대한 실험이 함께 이루어졌으며, 제안하는 방식이 지연시간의 단축 및 수율 최대화의 관점에서 적절함을 확인하였다.

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, Jun. 2009.
- [2] 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. ICTC*, pp. 626-629, Seoul, Korea, Sept. 2011.
- [3] C. H. Yun and Y. K. Lim, "ASO-TDMA: ad-hoc self-organizing TDMA protocol for shipborne ad-hoc networks," *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2012, no. 1, pp. 626-629, Dec. 2012.
- [4] 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.
- [5] 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. Inf. Commun. Eng.*, vol. 13, no. 10, pp. 2097-2104, Oct. 2009.

- [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] K. M. Cho, C. H. Yun, Y. K. Lim, and C. G. Kang, “A MAC Protocol for Integrated Service in the Multi-hop Maritime Communication Network,” *J. KICS*, vol. 38A, no. 7, pp. 603-611, Jul. 2013.
- [8] 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.
- [9] IEEE Std. 802.11-1999, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, Reference number ISO/IEC 8802-11:1999(E), IEEE Std. 802.11, 1999 edition, 1999.

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) 정보통신공학박사
 2007년 8월 : 광주과학기술원 (GIST) 정보통신공학박사
 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 : 한국해양과학기술원 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 이동통신연구회 위원장

2006년 1월~현재: 한국통신학회 상임이사/부회장

2008년 2월~현재: TTA PG702 IMT-WiBro 프로젝트 그룹 의장/TTA PG906 IMT 프로젝트 부의장
<관심분야> 이동통신 시스템, 무선 네트워크 및 응용 서비스