

# 전술 무인기 중계 네트워크의 슬롯 할당 지연 및 실패율 감소를 위한 분산 TDMA 기법

김 건 희\*, 백 호 기°

## Distributed TDMA Scheme for Reducing Both Slot Assignment Delay and Failure Rate in Tactical UAV Relay Network

Geonhui Kim\*, Hoki Baek°

요 약

본 논문에서는 전술 무인기 중계 네트워크 (TURN: Tactical UAV Relay Network)에서 전술 노드의 슬롯 할당 지연과 실패율을 줄이기 위한 분산 TDMA (Time Division Multiple Access) 기법을 제안한다. 기존 분산 TDMA 기법들은 슬롯 할당 지연이 크고 실패율이 높다는 문제가 있다. TURN은 무인기가 전술 메시지를 모든 노드에게 중계하는 멀티홉 네트워크인데, TURN에서 기존 기법들을 사용하면 무인기의 슬롯 할당 여부에 따라 이웃 노드에 대한 정보에 부재가 생기는 상황이 발생할 수 있어서, 지연과 실패율이 증가한다. 따라서 본 논문에서는 TURN 환경에서 낮은 슬롯 할당 지연과 낮은 실패율을 제공하는 URMA (UAV Relay-based Multiple Access) 기법을 제안한다. 시뮬레이션을 통해 본 논문의 제안 방식의 성능을 평가하며, 그 결과는 기존 분산 TDMA 기법들보다 낮은 슬롯 할당 지연과 실패율을 보여준다.

키워드 : 분산 TDMA, 멀티홉 네트워크, 중계, 전술 네트워크, 무인기

Key Words : Distributed TDMA, Multi-hop Network, Relay, Tactical Network, Unmanned aerial vehicle (UAV)

### ABSTRACT

In this paper, we propose a distributed TDMA (Time Division Multiple Access) scheme to reduce slot assignment delay and failure rate of tactical nodes in TURN (Tactical UAV Relay Network). Existing distributed TDMA schemes have a problem that slot assignment delays are large and failure rates are high. TURN is a multi-hop network in which the UAV relays tactical messages to all nodes. When existing schemes are used in TURN, there may be an absence of information about the adjacent node depending on whether the UAV slot is assignment, resulting in an increase in delay and failure rate. Therefore, this paper proposes URMA (UAV Relay-based Multiple Access) scheme that provides low slot assignment delay and low failure rate in TURN environment. The performance of the proposed scheme is evaluated through simulation, and the results show lower slot assignment delay and failure rate than existing distributed TDMA schemes.

\* 본 논문은 교육부 및 한국연구재단의 4단계 BK21 사업(경북대학교 컴퓨터학부 지능융합 소프트웨어 교육연구단)으로 지원된 연구임 (4199990214394)

• First Author : Kyungpook National University, School of Computer Science and Engineering, dududi042811@naver.com 정회원

° Corresponding Author : Kyungpook National University, School of Computer Science and Engineering, neloyou@knu.ac.kr, 중신회원

논문번호 : 202205-01-0-SE, Received April 30, 2022; Revised June 10, 2022; Accepted June 16, 2022

## 1. 서 론

현대전의 개념은 플랫폼 중심전에서 네트워크 중심 전으로 변화하였다. 그리고 네트워크 중심 작전을 수행하는데 전술데이터링크가 사용되고 있다. 네트워크 중심전에 참여하는 모든 노드는 데이터링크를 통해 다양한 전술 메시지(위치나 상태, 적 좌표, 영상, 음성, 지휘통제 등)를 서로 공유해야 하는데, 이에 브로드캐스팅이 주로 사용된다. 예를 들어 노드의 위치나 상태 정보는 PPLI(Precise participant location and identification) 메시지로, 탐지한 적 좌표 정보는 surveillance 메시지로 주기적으로 브로드캐스팅된다. 이때 전술데이터링크는 충돌 없이 브로드캐스팅을 보장하기 위해 TDMA (Time Division Multiple Access)를 주로 사용하고 있다.

TDMA 기법은 크게 중앙집중 TDMA 기법과 분산 TDMA 기법으로 나뉜다. 중앙집중 TDMA 기법은 특정 노드가 중앙에서 슬롯 할당을 주관하는 슬롯 할당 기법이다. 최근에 연구된 무장데이터링크 네트워크(WDLN: Weapon Data Link Network)<sup>[1]</sup>가 대표적이다. 네트워크 기반의 무기체계(NEW: Network-Enabled Weapon)인 유도미사일을 발사한 후, 표적 타격 직전까지 상황 정보를 공유하거나 표적을 정밀 조준 하는 등의 역할을 하고 무인기가 유도 미사일과 지휘부 사이에서 전술 메시지를 중계하는 역할을 한다. WDLN은 자원을 관리하는 지휘부가 존재한다는 점에서 본 연구와 차이가 있다. 중앙집중 TDMA 기법에서는 자원을 관리하는 노드에 문제가 생기면 네트워크 전체가 마비되는 문제가 발생할 수 있다.

분산 TDMA 기법에서는 슬롯 할당을 주관하는 별도의 노드 없이 분산 슬롯 할당 개념을 사용한다. 슬롯 할당을 특정 관리 노드가 담당하는 것이 아니라 모든 노드들이 협상을 통해 사용할 슬롯을 요청 및 승인 해주는 과정을 거친다. 따라서 중앙집중 TDMA와 다르게 관리 노드의 이상으로 인한 네트워크 마비의 문제가 발생하지 않는다는 장점이 있다. 한편, 차량 ad hoc 네트워크는 차량 간 안전 메시지(inter-BSM: inter-Basic Safety Message)를 빠른 시간 내에 안정적으로 공유해야 한다는 측면에서, 국방 전술 네트워크와 비슷하다. 차량 ad hoc 네트워크에서는 분산 TDMA 기법을 기반으로 한 프로토콜이 다양하게 연구되어왔다. 각 차량이 일정 주기마다 수신하는 신호 세기를 사용하여 이웃 차량과의 거리를 추정하고 이 정보를 SDMT(slot distance mapping table)에 담아, 거리 정보를 기반으로 슬롯을 할당하는 분산 TDMA

기법이 제안되었다<sup>[2]</sup>. 또, 메시지의 실시간성과 중요도에 따라 두 가지 원 모양의 영역 HPQR(High Perceptual Quality Region), BPQR(Basic Perceptual Quality Region)로 나누고, 각 차량이 각자 기준으로 이웃 차량이 속해있는 영역, 신호 전송 세기, 차량의 이동 속도, 이동 방향 등을 모두 고려하여 빈 슬롯을 선택하여 할당받는 분산 TDMA 기법도 제안되었다<sup>[3]</sup>. 이처럼, 최근에 차량 ad hoc 네트워크 환경을 고려한 분산 TDMA 기법이 활발히 연구되고 있다. 이러한 연구는 차량이 고속으로 이동하면서 서로 다른 네트워크가 겹쳐져 발생하는 합류 충돌(merging collision)에 초점을 맞추었다. 그리고 이 충돌을 회피하거나 해결하면서 슬롯을 할당하는 분산 TDMA 기법을 제안했다. 그러나 국방 전술 네트워크에서는 차량 ad hoc과 달리, 많은 노드가 고속으로 이동하지는 않기 때문에, 합류 충돌을 고려한 분산 TDMA 기법을 사용했을 때, 불필요한 오버헤드가 발생한다. 이 때문에, 차량 ad hoc 네트워크 환경을 고려한 분산 TDMA 기법은 본 논문에서 고려하는 환경에 적합하지 않다.

국방 전술 네트워크와 같이 고신뢰성이 요구되는 환경에서는 네트워크 마비가 치명적이기 때문에, 중앙집중 TDMA보다는 분산 TDMA 기법을 사용하는 것이 적절하다. 따라서 전술데이터링크는 분산 TDMA 기법에 초점을 맞춰서 연구가 진행되어왔다. 기존에 연구되었던 전술 네트워크 access 방식은 다음과 같다. USAP (Unifying Slot Assignment Protocol)<sup>[4]</sup>은 육군에서 멀티홉 ad hoc 네트워크에서 사용되는 기법이다. USAP에서는 프레임 사이클 내의 모든 노드가 돌아가며 고정된 길이의 프레임의 시작에 본인, 이웃의 슬롯 위치 정보와 요청 및 승인 메시지가 포함된 NMOP (Net Manager Operational Packet) 메시지를 보낸다. 이는 모든 이웃 노드의 프레임 정보를 수신해야만 슬롯을 할당할 수 있어 새로운 노드가 가입할 때 지연시간이 길다는 한계가 있다. USAP-MA (USAP Multiple Access)<sup>[5]</sup>는 육군에서 멀티홉 ad hoc 네트워크에서 음성 전송용으로 사용되는 기법으로, USAP의 개념을 확장한 것이다. USAP-MA에서는 프레임 사이클과 프레임 길이를 동적으로 변경하며 노드에 슬롯을 할당하지만, 프레임 사이클과 길이 변경 방법이 제안되어 있지 않으며, 새로운 노드의 가입이 불가능하다. ASAP (Adaptive Slot Assignment Protocol)<sup>[6]</sup>과 E-ASAP (Extended ASAP)<sup>[7]</sup>은 프레임 길이를 동적으로 변경하며 슬롯을 할당하는데, idle한 슬롯이 없을 때마다 프레임 길이가 2의 거듭제곱 형태로 증가

하여 오버헤드가 많이 증가하고, 프레임 길이를 다시 감소시킬 수 없는 문제가 있다. 실제 미군과 나토군에서 운용중이며 전 세계에서 널리 사용되는 전술데이터링크로는 Link-16과 Link-22가 있다<sup>8)</sup>. Link-16<sup>9)</sup>은 공군 중심의 데이터링크로, TDMA 기법을 사용한다. Link-16은 중앙노드 없이 네트워크 시작 전에 사람의 설계를 통해 자원이 정적으로 사전 할당된다. Link-22<sup>10)</sup>는 해군 중심의 데이터링크로, 분산 TDMA 기법 중 USAP의 개념을 해군의 전술 네트워크에 맞게 커스터마이징하여 만들어졌다. Link-16과 Link-22는 전 세계에서 가장 널리 사용되고 있는 전술데이터링크로, 중앙에서 자원을 관리하는 노드가 없다.

USAP, USAP-MA, ASAP, 그리고 E-ASAP은 슬롯을 할당할 때 인접한 모든 노드의 프레임 정보를 수신해야 하므로 슬롯 할당을 신속하게 해줄 수 없다는 문제가 있다. 이에, 프레임을 몇 개의 서브프레임으로 나누고, 각 서브프레임 내의 미니 슬롯에 2홉 이내의 이웃 노드 정보만을 수신하여, 슬롯을 빠르게 할당하는 F-DSA (Fast Dynamic Slot Assignment)가 제안되었다<sup>11,12)</sup>. F-DSA는 기존의 기법들과 달리, 노드가 언제든지 네트워크에 자유롭게 가입 및 탈퇴할 수 있다.

그러나 본 논문에서 고려하는 TURN (Tactical UAV Relay Network) 환경에서는 F-DSA도 한계점이 있다. TURN에서는 지상에 모든 전술 노드들이 무인기와 연결되어있고, 전술 노드 간 직접적인 연결이 보장되지 않아 무인기 중계를 통해 전술 메시지를 공유한다. 이러한 TURN 환경에 F-DSA를 적용하면 크게 두 가지 문제점이 발생한다. 첫째, 새로운 노드 또는 자원을 추가로 요청하는 노드가 무인기의 슬롯이 존재하지 않는 특정 서브프레임에 요청을 보낼 때 발생한다. 이 경우, 슬롯 할당 요청 패킷을 보낸 노드는 무인기와 통신하고 있는 2홉 이내의 모든 이웃 노드의 정보를 알 수 없기 때문에, 이미 할당되어있는 슬롯 위치에도 할당을 요구할 수 있게 되어 충돌이 발생하고, 슬롯 할당 지연이 길어질 수 있다. 둘째, 무인기가 TURN 환경에서 발생하는 전술 메시지를 매번 모든 노드에 중계하기 위해 슬롯 할당을 빈번하게 요청할 때 발생한다. 요청이 매우 빈번하게 발생하면, 요청 패킷의 충돌 확률이 높아지기 때문에, 지연이 길어질 수밖에 없다. 네트워크에서는 요청 패킷에 일정 횟수 이상 충돌이 발생하면, 해당 요청 패킷을 드롭시켜, 슬롯 할당을 포기한다. 그런데 위의 두 경우 모두 충돌을 많이 발생시키기 때문에, 슬롯 할당 실패율도 높아지는 문제가 있다. 그러나 전장에서 신속하고 정확한 전술 메시지의 공유는 필수적이기 때문에,

F-DSA는 무인기 중계를 기반으로 한 TURN 환경에 적합하지 않다.

본 논문에서는 노드가 무인기에 전술 메시지를 송신하고 다른 모든 노드에게 중계되기까지의 지연을 줄일 수 있는 URMA (UAV Relay-based Multiple Access) 기법을 제안한다. URMA에서는 앞서 언급한 F-DSA의 한계를 해결하기 위해 각 슬롯의 위치에 UL(Uplink) 슬롯과 DL(Downlink) 슬롯을 묶은 슬롯을 둔 프레임 구조를 설계한다. UL 슬롯과 DL 슬롯은 각각 노드로부터 무인기로, 무인기로부터 노드로 신호를 송신할 때 사용되는 슬롯을 의미한다. 이 기법은 F-DSA와 비교하여 프레임 길이가 두 배로 길지만, UL 슬롯으로 송신 후 DL 슬롯을 할당받을 때까지 생기는 긴 지연을 크게 감소시켜 이득을 얻을 수 있다. 이는 UL 슬롯과 DL 슬롯을 묶어둠으로써, 무인기를 별도의 노드로 고려하여 발생하는 과도한 슬롯 할당 요구 문제를 완화했기 때문에 가능하다. 또한, 제안된 기법은 슬롯 할당을 요청하는 노드가 무인기와 통신하는 모든 노드의 슬롯 위치 정보를 습득할 수 있게 함으로써 슬롯 할당 충돌을 저하시킨다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안한 URMA 기법이 기존의 F-DSA보다 낮은 슬롯 할당 지연과 낮은 실패율을 제공하는 것을 확인하였다.

## II. 관련 연구

Ad hoc 네트워크에서 동적으로 슬롯을 할당하는 분산 TDMA 기법으로 F-DSA가 있다. F-DSA는 노드에 타임 슬롯을 동적으로 할당하여, 네트워크 가입 탈퇴가 자유롭다.

F-DSA는 그림 1과 같이  $M$ 개의 서브프레임으로 이루어진 프레임이 주기적으로 반복되는 구조를 가지며, 서브프레임의 제어 구간(Signaling Period)과 데이터 전송 구간(Data Transmitting Period)은 각각  $N+3$ 개의 미니 슬롯과  $N$ 개의 타임 슬롯으로 구성되어 있다. 제어구간은 노드의 타임 슬롯 스케줄링에 필요한 정보를 교환하기 위한 4가지 종류(REQ, INF, SUG, REP)의 미니슬롯으로 구성된다. REQ(Request), SUG(Suggest), REP(Reply) 미니슬롯은 타임슬롯 할당을 위한 협상을 위해, INF(Information)는 이웃 노드의 슬롯 할당 정보 공유를 위해 존재한다.

새로운 노드 또는 자원을 추가로 요청하는 노드는 이미 슬롯을 할당받은 기존의 노드로부터 프레임 정보를 획득해야 한다. 이를 위해, 서브프레임의 REQ에 요청 패킷을 전송하고, INF 미니 슬롯에 슬롯을 할당

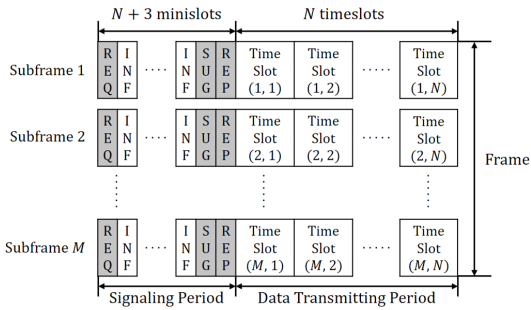


그림 1. F-DSA의 프레임 구조  
Fig. 1. Frame structure of F-DSA

받은 2홉 이내의 이웃 노드로부터 FI(Frame Information)를 수신한다. 이웃 노드는 서브프레임의 순번과 동일한 INF에 자신의 FI를 전송하는데, FI에는 자신과 이웃 노드가 할당받은 슬롯 위치 정보가 포함되어 있다. 새로운 노드는 수집한 FI들을 바탕으로 비어있는 슬롯을 추정하여 SUG에 자신의 FI를 송신한다. 이로써 새로운 노드는 이웃 노드에게 자신이 할당받은 슬롯 정보를 제안한다. 제안한 슬롯을 이미 할당받은 이웃 노드가 존재할 경우 충돌이 발생하며, 이때 REP에 충돌을 감지한 이웃 노드가 톤(tone)을 송신한다, 즉, 새로운 노드가 수신한 톤이 없으면 해당 슬롯이 사용 가능하다는 것을 의미하고, 수신한 톤의 개수와 상관없이 톤이 감지되면 해당 슬롯은 사용 불가능하다는 것을 뜻한다. 새로운 노드가 톤을 수신한 경우, 다음 서브프레임에서 위와 같은 절차로 다시 슬롯 할당을 요청한다. 모든 서브프레임에서 슬롯 할당에 실패하면, 일정 시간 이후 재시도한다.

F-DSA에서의 충돌은 1) 2홉 이내에 있는 모든 이웃 노드의 슬롯 위치 정보를 파악하지 못해, 이웃 노드가 사용하는 슬롯을 빈 슬롯이라 추정하고 SUG에 할당 요청을 보낼 때, 2) 두 개 이상의 노드가 동시에 REQ에 요청 패킷을 보낼 때 발생한다. 1)의 경우, 서브프레임에 부재한 노드로 인해 그 이웃 노드의 슬롯 위치 정보를 알 수 없을 때 발생하는데, 이웃 노드의 수가 많을수록 충돌이 일어날 가능성이 높아지고 이에 따라 지연도 길어진다. 본 논문에서 고려하는 TURN 환경에서는, 서브프레임에 부재한 노드가 무인기일 경우 네트워크의 지연에 매우 치명적일 수 있다. 그 이유는, TURN 환경에서는 각 노드가 전송 메시지를 무인기에게 송신하고, 무인기는 이를 모든 노드에게 중계하여, 무인기와 통신하는 노

드가 많을 가능성이 높기 때문이다. 또한 2)의 경우, TURN 환경에서 자주 슬롯 할당을 할 수 밖에 없

는 무인기를 별도의 노드로 취급함으로써, REQ에 무인기의 요청 패킷이 누락될 때 발생할 확률이 높아진다. 2)로 인한 충돌이 잦으면, 노드가 무인기에게 전송 메시지를 보낸 후, 해당 전송 메시지가 모든 노드에게 중계되기까지 많은 지연이 발생한다.

### III. 제안 기법

전시 상황에서 지상 인프라가 훼손 등으로 부재한 상황을 고려하여, 그림 2와 같이 전송 노드에 무선 네트워크를 지원하기 위한 무인기를 배치한다. 그림 2에서 같은 원 안에 인접해있는 노드 간은 모두 연결되어 있기 때문에, 서로의 슬롯 정보를 항상 파악할 수 있다. 그러나 떨어진 원에 있는 노드와는 반드시 무인기를 통해 슬롯 정보를 파악할 수 있다. 예를 들어, 노드 A는 노드 B, 노드 C의 슬롯 정보를 직접 파악할 수 있지만, 노드 D의 슬롯 정보는 무인기를 통해서만 파악할 수 있다. 이러한 네트워크를 일컬어 TURN이라 하며, 이때 무인기는 노드가 보내는 전송 메시지를 모든 노드에게 중계하는 역할을 한다. 본 논문에서 TURN 환경 내의 무인기에 대한 특징은 다음과 같이 가정한다. 소규모 네트워크인 TURN 환경에서 운용되는 무인기는 크기가 작고 무게가 가벼우며 값이 싼 특징이 있어, 다수의 무인기를 확보할 수 있고 언제든지 손쉽게 공중에 배치할 수 있다. 또한, 무인기가 공격을 받거나 문제가 생겨 제대로 운용할 수 없을 때, 네트워크에 끼치는 영향을 최대한 줄이기 위해, 무인기가 중계하는 역할만을 수행하게 함으로써 역할을 최소화한다. 따라서 무인기가 공격을 받더라도 빠른 시간 내에 다시 안정적인 네트워크를 형성할 수 있다. 또한, 무인기는 네트워크에서 중계하는 역할만을 수행하기 때문에, 무인기 자체에서 추가적인 트래픽이 발생하지 않는다. 그리고 특정 노드로부터 수신한 모든 전송 메시지를 커버리지 내에 있는 모든 노드에게 항

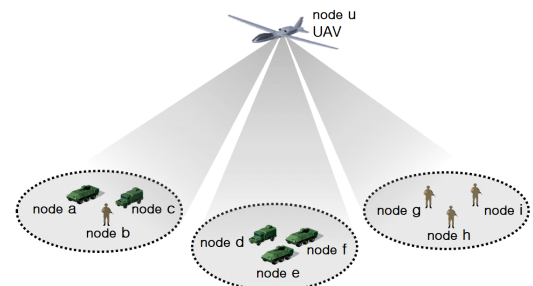


그림 2. TURN 토폴로지  
Fig. 2. TURN topology

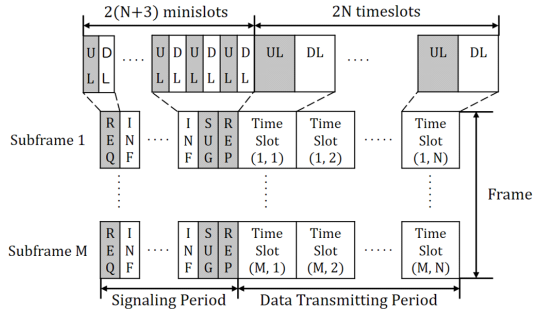


그림 3. URMA의 프레임 구조  
Fig. 3. Frame structure of URMA

상 중계한다. 따라서 노드에서 무인기로의 UL 슬롯과 무인기에서 노드로의 DL 슬롯의 개수가 항상 같다.

TURN 환경에서 F-DSA의 한계점은, 각 서브프레임의 미니슬롯과 슬롯을 두 개의 슬롯으로 분할함으로써 해결할 수 있다. URMA는 F-DSA의 서브프레임 개념을 확장하였으며, 프레임 구조는 그림 3과 같다. 하나의 프레임은  $M$ 개의 서브프레임으로 이루어져 있으며, 각 서브프레임은 제어 구간과 데이터 전송 구간으로 나뉜다. 제어구간의 REQ, SUG, REP와  $N$ 개의 INF 미니 슬롯은 각각 UL 슬롯과 DL 슬롯으로 나뉘어, 제어 구간은 총  $2(N+3)$ 개의 슬롯으로 구성된다. 데이터 전송구간 또한 모든 타임 슬롯이 UL 슬롯과 DL 슬롯으로 이루어져, 총  $2N$ 개의 슬롯으로 구성되어 있다. UL 슬롯과 DL 슬롯은 각각 노드에서 무인기로, 무인기에서 노드로 패킷을 전송할 때 사용되는 슬롯을 의미한다.

URMA에서는 새로운 노드 또는 새로운 자원을 요청하는 노드가 REQ의 UL에 요청 패킷을 보내면, 직후에 해당 요청이 REQ의 DL에 무인기에 의해 무인기 커버리지 내의 모든 노드에게 송신된다. 이로써, 같은 무인기의 커버리지 내에 있는 노드는 모두 서로 인접 노드인 것처럼 인식하게 된다. 따라서 앞서 섹션 II에서 언급한 1)에 의한 충돌이 발생하지 않는다. 또한, 무인기를 별도의 노드로 취급하지 않고, 프레임 구조에서 슬롯마다 DL 슬롯을 할당해줌으로써, 2)로 인한 지연을 줄일 수 있다.

#### IV. 실험

본 논문은 비교를 위해 URMA로 슬롯을 할당할 때와 F-DSA로 슬롯을 할당할 때 소요된 총 지연시간을 평가하였다. 해당 실험에서 총 지연시간  $D_{total}$ 은 모든 노드가 성공적으로 슬롯을 한 번씩 할당받고, 무

인기가 모든 전송메시지에 대한 중계 슬롯을 할당받을 때까지 소요된 서브프레임 개수의 합계이다.

그림 4와 그림 5는 각각 F-DSA와 URMA에 대한 슬롯 할당 플로우차트를 나타낸다. 그림 4와 그림 5에서 각 매개변수가 의미하는 바는 다음과 같다.  $N$ 은 노드의 수,  $x$ 는 전송 메시지의 중계를 위해 요구되는

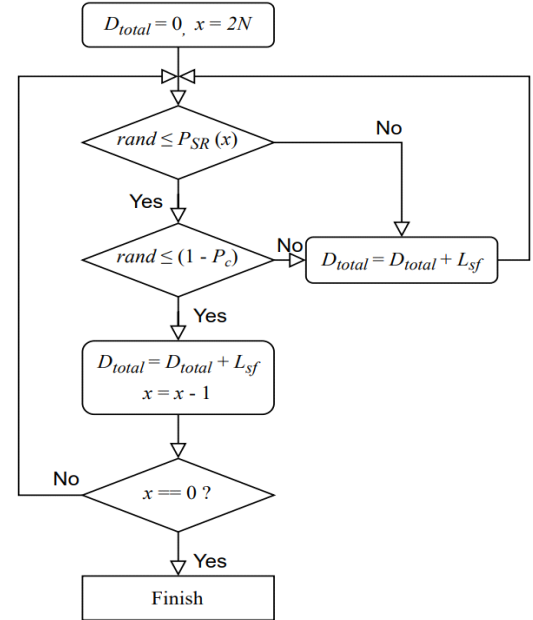


그림 4. F-DSA에서의 슬롯 할당 플로우차트  
Fig. 4. Flowchart of slot assignment in F-DSA

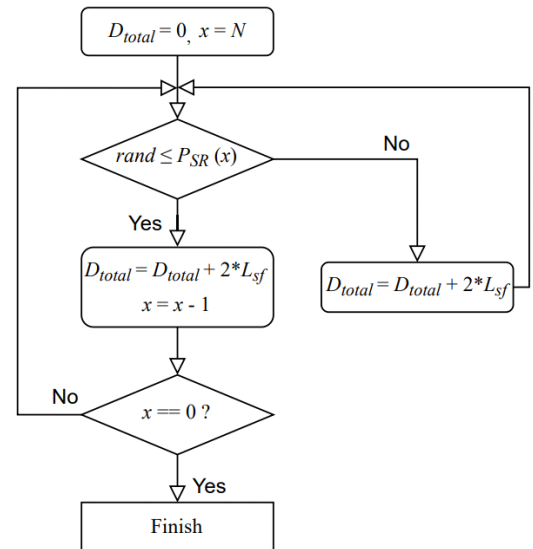


그림 5. URMA에서의 슬롯 할당 플로우차트  
Fig. 5. Flowchart of slot assignment in URMA

슬롯 할당 횟수,  $rand$ 는 0 이상 1 미만의 값을 가지는 임의의 실수,  $P_a$ 는 노드가 REQ에 요청 패킷 송신을 시도할 확률,  $P_{SR}$ 은 노드가 REQ에 요청 패킷 송신을 성공할 확률,  $P_c$ 는 SUG에 통지한 FI에 대해 충돌이 발생해 REP에 톤을 수신할 확률,  $L_{sf}$ 는 서브프레임의 길이,  $\beta$ 는 드롭(drop) 임계치를 의미한다. 실험 매개 변수는 표 1에서 확인할 수 있다.

여기서 드롭이란 슬롯 할당을 포기하는 것을 의미한다. 모든 실험에서 각 노드가 슬롯 할당을 시도하여  $\beta$ 번 실패했을 때, 해당 요청 패킷을 드롭 시킨다.

F-DSA에서는  $N$ 개의 노드가 전술 메시지 송신을 위해 각각 한 개의 슬롯을 할당받고, 무인기가 모든 전술 메시지의 중계를 위해  $N$ 개의 슬롯을 할당받아야 하므로,  $x$ 의 초깃값을  $2N$ 으로 설정한다. 그리고 난수를 발생시켜  $P_{SR}$ 과 비교한다. 여기서  $P_{SR}$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{SR}(x) = \binom{x}{1} P_a (1 - P_a)^{x-1} \quad (1)$$

난수가  $P_{SR}$  이하인 경우는 해당 노드가 REQ에 요청 패킷을 성공적으로 송신했다는 것을 의미한다. 요청 패킷 송신에 실패한 경우,  $D_{total}$ 을  $L_{sf}$ 만큼 증가시키고 요청 패킷 송신을 다시 시도할 수 있게 한다. 요청 패킷 송신에 성공한 경우, 다시 한 번 난수를 발생시켜  $1 - P_c$ 과 비교한다. 여기서 난수가  $1 - P_c$ 이하인 경우는 REP에 충돌이 일어나지 않고 해당 노드가 성공적으로 슬롯을 할당받은 상황을 의미한다. 슬롯 할당에 실패한 경우,  $D_{total}$ 을  $L_{sf}$ 만큼 증가시키고 요청 패킷 송신을 다시 시도할 수 있게 한다. 성공적으로 슬롯을 할당받은 경우,  $D_{total}$ 을  $L_{sf}$ 만큼 증가시키고  $x$ 값을 1 감소시킨다.  $x$ 값이 0과 같아질 때까지 요청 패킷 송신을 다시 시도할 수 있게 하여 위 과정을 반

표 1. 시뮬레이션 파라미터  
Table 1. Simulation parameters

Parameter	Value
Number of nodes ( $N$ )	10, 20, 30, 40, 50
Probability of requesting in REQ( $P_a$ )	0.1, 0.4
Probability of collision in REP ( $P_c$ )	0, 0.3, 0.6
Subframe length ( $L_{sf}$ )	1
Drop threshold ( $\beta$ )	10

복한다.

URMA에서는 프레임 내에 DL 슬롯이 존재하여 무인기의 슬롯 할당이 별도로 필요하지 않기 때문에  $x$ 의 초깃값을  $N$ 으로 설정한다. 그리고 F-DSA와 같은 방법으로 난수를 발생시켜  $P_{SR}$ 과 비교한다. 해당 노드가 요청 패킷 송신에 실패한 경우,  $D_{total}$ 을  $2 \times L_{sf}$ 만큼 증가시키고 요청 패킷 송신을 다시 시도할 수 있게 한다. 여기서 서브프레임 길이가  $2 \times L_{sf}$ 인 이유는, URMA에는 각 슬롯이 UL 슬롯과 DL 슬롯으로 구성되어, 서브프레임 길이가 F-DSA의 2배이기 때문이다. 해당 노드가 요청 패킷 송신에 성공한 경우,  $D_{total}$ 을  $2 \times L_{sf}$ 만큼 증가시키고  $x$ 값을 1 감소시킨다. 그리고  $x$ 값이 0과 같아질 때까지 요청 패킷 송신을 다시 시도할 수 있게 하여 위 과정을 반복한다. URMA의 경우, III장에 언급한 이유로 REP에서 충돌이 일어나지 않아, 난수를  $1 - P_c$ 와 비교하지 않는다.

매개 변수에 따른 각 경우를 10,000번 실행한 실험 결과는 그림 6, 표 2와 그림 7, 표 3과 같이 그래프로 나타냈다. 그림 6과 표 2는  $P_a$ 가 0.1일 때, 그림 7과 표 3은  $P_a$ 가 0.4일 때의 노드 수  $N$ 에 따른 총 지연 시간  $D_{total}$ 과 중계를 위한 슬롯 할당에 성공한 평균 노

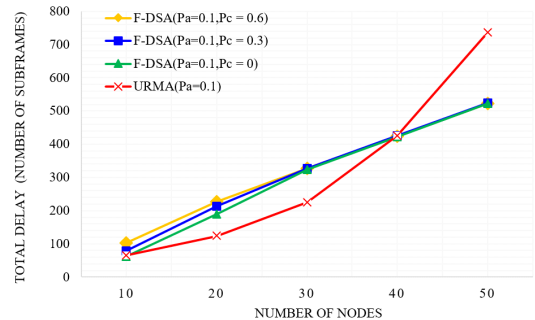


그림 6. 노드 수에 따른 평균 총 지연 시간 ( $P_a = 0.1$ )  
Fig. 6. Average total delay according to the number of nodes ( $P_a = 0.1$ )

표 2. 중계를 위한 슬롯 할당에 성공한 평균 노드 수 비교 ( $P_a = 0.1$ )

Table 2. Comparison of the average number of nodes that succeeded in assigning slots for relay ( $P_a = 0.1$ )

Number of nodes Scheme	10	20	30	40	50
F-DSA ( $P_a=0.1, P_c=0.6$ )	5	5	4	3	3
F-DSA ( $P_a=0.1, P_c=0.3$ )	8	11	8	7	6
F-DSA ( $P_a=0.1, P_c=0$ )	9	15	11	10	9
URMA ( $P_a=0.1$ )	9	19	28	36	35

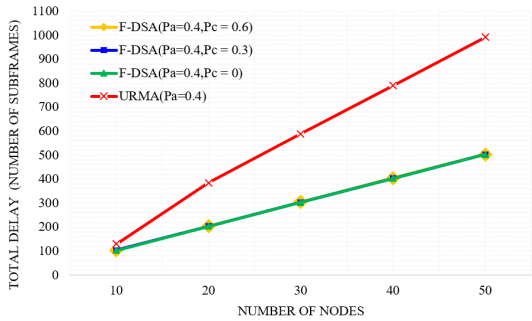


그림 7. 노드 수에 따른 평균 총 지연 시간 ( $P_a = 0.4$ )  
 Fig. 7. Average total delay according to the number of nodes ( $P_a = 0.4$ )

표 3. 중계를 위한 슬롯 할당에 성공한 평균 노드 수 비교 ( $P_a = 0.4$ )  
 Table 3. Comparison of the average number of nodes that succeeded in assigning slots for relay ( $P_a = 0.4$ )

Number of nodes Scheme	10	20	30	40	50
F-DSA ( $P_r=0.4, P_c=0.6$ )	1	1	1	1	1
F-DSA ( $P_r=0.4, P_c=0.3$ )	2	1	1	1	1
F-DSA ( $P_r=0.4, P_c=0$ )	2	2	2	2	2
URMA ( $P_r=0.4$ )	8	5	4	4	4

드 수를 나타낸다. 실험에서 슬롯 할당을  $\beta$ 번 실패했을 때 노드가 드롭 되는데, 이 때 REQ에 요청 패킷 송신을 실패한 경우와 REP에 톤을 수신한 경우 모두를 슬롯 할당에 실패했다고 정의한다. F-DSA에서는  $N$ 개의 노드가 각각 한 개의 슬롯을 할당받고, 무인기가 중계를 위해 슬롯을  $N$ 번 할당받아야 하므로, 총  $2N$ 개의 슬롯을 할당받아야 한다. 반면 URMA에서는  $N$ 개의 노드가 각각 한 개의 슬롯을 할당받기만 하면 된다. 표 2와 표 3은 전송 메시지를 중계하기 위해 필요한 슬롯을 성공적으로 할당받은 노드 수를 나타낸다. F-DSA에서는 노드가 타임 슬롯을 성공적으로 할당받고, 해당 노드가 송신한 메시지를 중계하기 위한 타임 슬롯을 무인기가 성공적으로 할당받은 경우를 중계를 위해 필요한 슬롯 할당에 성공하였다고 한다. 그리고 URMA에서는 노드가 UL 슬롯과 DL 슬롯이 합쳐진 하나의 타임 슬롯을 성공적으로 할당받은 경우를 두고 중계를 위해 필요한 슬롯 할당에 성공하였다고 한다.

URMA는 F-DSA에 비해 충돌이 적게 발생하나, 서브프레임 길이가 2배 길다는 특징이 있다. 그럼에도  $P_a$ 가 0.1일 때, 본 논문에서 제안한 URMA에서의 총 지연 시간은 F-DSA와 비교했을 때 작은 것을 그림 6

에서 확인할 수 있다. F-DSA에서는  $P_c$ 가 클수록 지연이 더 길어졌다. TURN 환경에서 F-DSA를 적용하면  $P_c$ 값이 존재할 수밖에 없으나, URMA에서  $P_c$ 값이 항상 0임을 고려하여 F-DSA에서  $P_c$ 가 0인 경우를 가정하여 실험해보았다. 그 결과, F-DSA에서 REP에 충돌이 발생하지 않더라도 URMA의 성능이 뛰어났다. 노드 수가 40 이상일 때, URMA의 지연 시간이 더 높아지는데, 그 이유는 다음과 같다. F-DSA에서 노드  $N$ 개의 모든 전송 메시지를 성공적으로 중계하기 위해 할당받아야 하는 슬롯은 총  $2N$ 개다. 그러나 노드가 슬롯 할당에 실패하면, 무인기가 해당 노드의 전송 메시지를 중계하기 위한 슬롯을 할당할 필요가 없어서, 슬롯 할당 요청 패킷을 보내지 않는다. 예를 들어, 총  $N$ 개의 노드 중  $k$ 개의 노드가 드롭 될 경우, 무인기는  $N-k$ 개의 슬롯만 할당받으면 된다. 그런데, 해당 실험 결과 F-DSA에서 노드 수가 많아질수록 더 많은 비율의 노드가 드롭 되어, 무인기가 슬롯 할당을 시도하지 않는 상황이 매우 잦아졌다. 이 때문에, URMA에서 노드 수가 40 이상일 때 지연 시간이 더 길게 나타났다. 또한, 그림 6에서 F-DSA가 노드 수가 많아질수록 지연 시간이 비슷하게 나타나는데, 이는 노드 수가 많아지면서 대부분의 노드가 드롭 되기 때문이다.  $P_a$ 의 값이 동일할 때, 노드 수가 많아질수록 동시에 요청 패킷을 보내는 노드 수가 많아지기 때문에 REQ에서의 충돌이 잦아지며, 노드 수가 적을 때와 비교해 이미 할당된 슬롯이 많으므로 SUG에서의 충돌이 잦아진다. 이 때문에 많은 노드가 드롭 되어, 해당 실험에서 노드 수가 많아질수록 드롭 되는 노드의 비율이 매우 커져,  $P_c$ 의 값에 관계없이 드롭 된 노드 수가 비슷했다. 그런데 하나의 노드가 드롭 되기까지 시도한 횟수는 10으로 동일하며, 비슷한 수의 노드가 드롭 되었기 때문에 지연 시간이 비슷하게 나타난 것이다.

표 2에서 나타난 바와 같이, F-DSA는 실제 운용이 불가능할 정도로 실패율이 높게 나타난 것에 비해, URMA는 대부분의 노드가 중계에 성공하였다. 특히, F-DSA에서  $P_c$ 를 0으로 설정했음에도 불구하고, 노드 수가 많아질수록 송신 실패율이 더 높아졌다. 지연 시간과 슬롯 할당 실패율을 함께 고려해보면, 노드 수가 50일 때 URMA에서의 지연 시간은 약 1.4배로 더 크지만, 슬롯 할당 실패율은 F-DSA에서  $P_c$ 값이 0일 때 약 3.9배, 0.6일 때 약 11.7배 더 높다. 즉, F-DSA로 URMA와 같은 수의 노드를 중계를 위한 슬롯 할당에 성공하게 하려면, URMA보다 상당히 긴 지연

시간이 생길 수밖에 없다. 그림 6에서 지연 시간 측면에서 성능이 저하한 것처럼 보이지만, 실패율과 종합하여 보면 URMA에서 상당히 나은 성능을 기대할 수 있다.

$P_a$ 가 0.4일 때, 표 3을 보면 F-DSA에서  $P_c$ 의 값을 0으로 설정하였음에도 불구하고,  $N$ 의 값에 관계없이 최대 2개의 노드만 중계를 위한 슬롯 할당에 성공하였다. 해당 실험의 F-DSA에서 거의 모든 노드가 드롭 되어, 무인기는 노드의 전술 메시지를 중계하기 위한 슬롯을 할당할 필요가 없어서 슬롯 할당 요청 패킷을 보내지 않았다. 이 때문에 그림 7에서 URMA보다 지연 시간이 더 낮게 나타났지만, F-DSA는 최대 2개의 노드만 중계를 위한 슬롯 할당에 성공하는 정도의 성능으로, 실제 운용이 불가능한 수준이다. 해당 실험에서  $P_a$ 의 값은 0.4로, 동시에 슬롯 할당 요청 패킷을 보내는 노드 수가 많기 때문에 URMA에서도 적은 수의 노드만이 중계하기 위한 슬롯 할당에 성공하였다. 그러나 그림 7의 지연 시간과 함께 고려하여 평가하면, 노드 수  $N$ 의 값이 50일 때 URMA에서는 F-DSA에서와 비교하여  $P_c$ 값이 0일 때는 2배, 0.6일 때는 4배 많은 노드가 중계하기 위한 슬롯 할당에 성공하였다. 그에 비해, 지연 시간은 약 1.9배로 URMA에서의 성능이 뛰어난 것을 알 수 있다.  $P_c$ 값이 0인 경우, 성능이 뛰어난 정도가 미미한 정도이나, 실제 환경에서 F-DSA의 특성상  $P_c$ 값이 존재할 확률이 매우 크다는 것 고려하면, URMA의 성능이 항상 F-DSA보다 뛰어나다고 할 수 있다.

URMA와 F-DSA의 기여도를 비교분석하여 정리하면 다음과 같다. URMA에서는 F-DSA와 비교하여 슬롯 할당 실패율이 낮고, 슬롯 할당 실패율을 함께 고려하였을 때의 지연 시간이 상당히 작으므로, 전장에서 전술 메시지를 보다 안정적으로 송수신할 수 있다. F-DSA는  $N$ ,  $P_a$ ,  $P_c$ 의 값이 커질수록 슬롯 할당 실패율과 지연 시간의 측면에서 성능이 운용할 수 없는 수준으로 떨어진다.

## V. 결 론

본 논문에서는 TURN 환경에서 빠르게 슬롯을 할당함으로써 전술 메시지 중계 지연을 줄이는 URMA를 제안했다. URMA에서는 서브프레임의 모든 슬롯의 위치에 UL 슬롯과 DL 슬롯을 묶은 슬롯을 두어, 충돌과 지연을 줄일 수 있었다. 실험을 통해 REP에 충돌이 발생할 확률 값을 다양하게 설정하여, F-DSA

와 URMA에서의 총 지연 시간을 비교하였는데, 실험 결과에 따르면 URMA는 F-DSA와 비교하여 프레임 길이가 2배임에도 불구하고, 슬롯 할당 지연과 패킷 드롭을 줄여 더욱 우수한 성능을 보인다는 것을 알 수 있었고, TURN 환경에 적합하다는 것을 확인할 수 있었다.

## References

- [1] S. Choi, H. Baek, J. Lim, K. Koh, and Y. Ko, "Dynamic TDMA structure satisfying requirements of weapon data link network," *J. KICS*, vol. 44, no. 6, pp. 1055-1063, Jun. 2019. (<http://doi.org/10.7840/kics.2019.44.6.1055>)
- [2] Y. Deng, D. Kim, Z. Li, and Y. Choi, "Implementing distributed TDMA using relative distance in vehicular networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 7, pp. 7295-7305, Jul. 2020. (<http://doi.org/10.1109/TVT.2020.2989524>)
- [3] S. Li, Y. Liu, and J. Wang, "An efficient broadcast scheme for safety-related services in distributed TDMA-Based VANETs," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 23, no. 8, pp. 1432-1436, Aug. 2019. (<http://doi.org/10.1109/LCOMM.2019.2923412>)
- [4] C. D. Young, "USAP: A unifying dynamic distributed multichannel TDMA slot assignment protocol," *IEEE Military Commun. Conf.*, pp. 235-239, McLean, VA, USA, Oct. 1996. (<http://doi.org/10.1109/MILCOM.1996.568620>)
- [5] C. D. Young, "USAP multiple access: Dynamic resource allocation for mobile multihop multichannel wireless networking," *IEEE Military Commun. Conf.*, pp. 271-275, Atlantic City, NJ, USA, Nov. 1999. (<http://doi.org/10.1109/MILCOM.1999.822686>)
- [6] A. Kanzaki, T. Uemukai, T. Hara, and S. Nishio, "Dynamic TDMA slot assignment in ad hoc networks," *17th IEEE Advanced Inf. Netw. and Appl.*, pp. 330-335, 2003. (<http://doi.org/10.1109/AINA.2003.1192899>)
- [7] A. Kanzaki, T. Hara, and S. Nishio, "An



adaptive TDMA slot assignment protocol in ad hoc sensor networks,” *ACM Symp. Applied Comput.*, pp. 1160-1165, Mar. 2005.

(<https://doi.org/10.1145/1066677.1066938>)

- [8] J. Hwang, K. Lee, and S. Jung, “A study on the multi-tactical data link data management,” *J. Korea Inst. Electron. Commun. Sci.*, vol. 15, no. 3, pp. 457-464, Jun. 2020.  
(<https://doi.org/10.13067/JKIECS.2020.15.3.457>)
- [9] “*Understanding link-16: A guidebook for new users*,” NCTSI, San Diego, CA, USA, Tech. Rep., pp. 5.47-5.49, Sep. 2001.
- [10] A. Kotlowski and S. Grob, “Potential of the fixed frequency HF communication medium in the upgrading NATO Tactical Data Link 22,” *10th IET Int. Conf. Ionospheric Radio Syst. and Techniques 2006*, pp. 43-48, London, UK, Jul. 2006.  
(<http://doi.org/10.1049/cp:20060300>)
- [11] J. Lee, K. Lee, and J. Lim, “Distributed dynamic slot assignment scheme for fast broadcast transmission in tactical ad hoc networks,” *IEEE Military Commun. Conf.*, pp. 1-6, Orlando, FL, USA, Oct. 2012.  
(<http://doi.org/10.1109/MILCOM.2012.6415607>)
- [12] J. Lee, K. Lee, and J. Lim, “F-DNA: A fast dynamic slot assignment protocol for ad hoc networks,” *IEICE Trans. Commun.*, vol. E95-B, no. 12, pp. 3902-3905, Dec. 2012.  
(<http://doi.org/10.1587/TRANSCOM.E95.B.3902>)

김 건 희 (Geonhui Kim)



2019년 2월~현재: 경북대학교  
컴퓨터학부 학사과정  
<관심분야> 다중 접속, 전송데  
이터링크, 무인기 배치

백 호 기 (Hoki Baek)



2006년 2월: 아주대학교 정보  
및 컴퓨터공학 학사  
2008년 2월: 아주대학교 정보  
통신공학 석사  
2014년 2월: 아주대학교 컴퓨  
터공학 박사  
2014년 3월~2015년 2월: 아주  
대학교 장위국방연구소 전임연구원  
2015년 3월~2021년 2월: 아주대학교 국방디지털융  
합학과 강의교수  
2021년 3월~현재: 경북대학교 컴퓨터학부 조교수  
<관심분야> 5G/6G, UAV 통신네트워크, V2X, IoT,  
국방전술네트워크, 시간동기, 위치인식  
[ORCID:0000-0001-9213-7845]