

군집 드론 식별을 위한 유휴 슬롯이 없는 Slotted ALOHA 프로토콜

최 현 호*, 이 호 원°, 강 규 민*

Idleless Slotted ALOHA Protocol for Drone Swarm Identification

Hyun-Ho Choi*, Howon Lee°, Kyu-Min Kang*

요 약

본 논문에서는 드론 운용 환경 및 무선 채널 특성을 고려하여 군집드론을 식별하기 위한 MAC 프로토콜을 설계한다. 드론의 고속 이동성, 급변하는 네트워크 토폴로지, 무선 채널 특성을 고려하여 idle-less slotted ALOHA (ILS-ALOHA) 프로토콜을 제안한다. 제안하는 ILS-ALOHA 프로토콜은 slotted ALOHA에서 빈번하게 발생하는 유휴(idle) 슬롯을 감지하고 이 유휴 슬롯에서 REQ 및 ACK와 같은 제어 정보를 전송함으로써 군집 드론의 접속을 동적으로 제어하고 불필요한 접속을 막아 충돌확률을 낮춘다. 시뮬레이션을 통하여 제안하는 ILS-ALOHA가 빈번하게 발생하는 유휴 슬롯에서 기존 slotted ALOHA 프로토콜보다 동적으로 접속 제어 정보를 전송함으로써 드론의 충돌확률을 낮추고 처리율을 높일 수 있음을 확인하였다. 아울러, 제안하는 ILS-ALOHA는 유휴 슬롯마다 ACK를 전송함으로써 ACK 손실이 발생하는 환경에서 ACK 수신률을 높임으로써 드론의 불필요한 재접속을 막아 충돌확률을 낮추고 처리율 및 지연 성능을 향상시킬 수 있다.

Key Words : Slotted ALOHA, drone identification, medium access control, idleless slotted ALOHA.

ABSTRACT

In this paper, we design a MAC protocol to identify a drone swarm considering the wireless environment and radio channel characteristics of flying drone. We propose an idle-less slotted ALOHA (ILS-ALOHA) protocol considering the drone's high-speed mobility, rapidly changing network topology, and radio channel characteristics. The proposed ILS-ALOHA protocol detects the frequent occurrences of idle slots and transmits control information such as REQ and ACK in these idle slots to dynamically control the random access of drones and prevent unnecessary accesses to lower collision probability. Through extensive simulations, it was verified that the proposed ILS-ALOHA can reduce the collision probability of drones and increase the throughput by dynamically transmitting access control information in idle slots against the conventional slotted ALOHA protocol. In addition, the proposed ILS-ALOHA increases ACK reception rate in a wireless environment where ACK loss occurs by transmitting ACK more frequently in each idle slot, thereby preventing unnecessary re-access of drones, reducing collision probability, and improving throughput and delay performances.

※ 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 정보통신·방송 연구 개발사업의 일환으로 수행하였음 [2019-0-00499, 저고도 소형드론 식별·주파수 관리 기술 개발].

♦ First Author : Hankyong National University, School of ICT, Robotics & Mechanical Engineering, hhchoi@hknu.ac.kr, 종신회원
° Corresponding Author : Hankyong National University, School of Electronic & Electrical Engineering, hwlee@hknu.ac.kr, 종신회원

* Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI), kmkang@etri.re.kr, 정회원

논문번호 : 202004-096-A-RN, Received April 23, 2020; Revised May 29, 2020; Accepted June 23, 2020

I. 서 론

최근 다수의 소형 드론이 비행하는 경우 드론의 등록 여부, 운전자의 확인, 경로 추적 등을 위하여 해당 드론들을 원거리에서 무선통신을 이용하여 식별해야 할 필요성이 대두되었다^[1]. 이와 관련하여 최근 미국 연방항공청은 드론 원격 식별 및 추적을 위한 기술적 요구사항을 발표하였고^[2], 유럽 항공 안전청은 드론 식별 요구사항이 포함된 드론 설계 및 드론 운용 절차에 관한 규정을 발표하였다^[3]. 이와 발맞추어 IEEE 802, 3GPP, RTCA (Radio Technical Commission for Aeronautics)와 같은 국제 표준화 기구에서는 소형드론의 무선식별을 위한 통신의 표준화 활동을 진행하고 있다^[4,5]. 드론의 무선식별 기술은 비행금지 구역 등에 침범한 드론을 발견하고 무선으로 드론 identifier (ID)를 요청하고 이를 확인하여 기체 등록 정보와 드론 소유주 등을 파악하는 기술이다. 이러한 드론 ID 식별은 다수의 드론이 동시에 발생하거나 군집 이동할 때에도 정해진 시간 내에 정확하게 이루어져야 한다^[6].

일반적으로 무선 통신 환경에서 ID 수집 방식은 request (REQ)-response (RES) 기반으로 동작한다^[8]. 대표적인 ID 식별 시스템인 RFID (Radio-Frequency Identification)도 REQ-RES 기반의 ID 수집 방식을 채택하고 있다^[9]. 이러한 ID 수집 방식에서 지상국 (ground station)은 군집 드론에게 ID 전송을 요청하는 REQ 패킷을 방송하고, 이를 수신한 드론은 자신이 가진 ID 값을 기지국에게 전송한다. 이때 드론은 주어진 무선 자원을 랜덤하게 선택하여 ID 패킷을 전송하기 때문에 같은 자원을 선택한 다른 드론과 충돌이 발생할 수 있다. 따라서 접속 충돌을 회피하면서도 자원을 효율적으로 사용하는 매체접속제어 (medium access control, MAC) 프로토콜의 설계가 필요하다^[10].

드론 환경에서는 높은 이동성, 급변하는 드론-지상국간 무선 채널, 드론과의 먼 거리에 따른 전파감쇠로 인하여 지상국에서 드론으로 전송되는 acknowledgement (ACK) 패킷의 손실이 발생할 수 있다^[11]. 드론은 이동에 의해 전파 수신 영역을 벗어나 ACK를 받지 못할 수 있으며, 이동 시 건물, 나무 등의 장애물에 막혀 ACK를 수신하지 못할 수 있다. 또한, 1-5 km 이상 원거리의 드론을 식별해야 하므로 신호 감쇠로 인하여 디코딩에 필요한 충분한 수신 신호세기를 얻지 못할 수 있다. 지상국은 드론으로부터 ID를 수신하면 다음 프레임에서는 ID를 아직 받지 못한 남은 드론 수에 맞게 슬롯 개수를 줄인다. ACK를 정상적으

로 수신한 드론은 식별 정보가 전달되었음을 확인하고 전송을 마치지만, 전송에 성공하고도 ACK 수신에 실패한 드론은 재전송을 시도하기 때문에 추가적인 충돌이 발생한다. 따라서 드론 식별 환경에서는 ACK의 손실까지도 고려한 랜덤 접속 프로토콜의 설계가 필요하다.

RFID 시스템은 간단하면서도 효과적으로 다수 단말을 식별하기 위하여 slotted ALOHA 프로토콜을 사용하고 있다^[12]. Slotted ALOHA에서 각 단말은 제공되는 슬롯들 중 하나를 랜덤하게 선택하는데, 한 슬롯을 한 단말만 선택한 경우에 전송에 성공하고, 두 개 이상의 단말이 선택한 경우 충돌이 발생하여 전송에 실패한다. 반면 단말이 접속하지 않은 슬롯은 유휴 (idle) 슬롯이 된다. Slotted ALOHA는 랜덤 접속의 속성으로 인하여 성공 비율이 약 37 % 정도 밖에 안되며, 전송에 사용되지 않는 유휴 슬롯이 동일하게 높은 비율을 차지한다. 높은 비율을 차지하는 충돌과 유휴 슬롯은 slotted ALOHA가 낮은 효율을 갖는 주요 원인이므로 slotted ALOHA 방식의 낮은 효율을 개선할 수 있는 방안이 제시되어야 한다.

본 논문에서는 드론 운용 환경 및 무선 채널 특성을 고려하여 군집드론을 식별하기 위한 MAC 프로토콜을 설계한다^[8]. 드론의 고속 이동성과, 급변하는 네트워크 토폴로지, 드론 무선 채널 특성을 고려한 slotted ALOHA 기반의 idle-less slotted (ILS)-ALOHA 프로토콜을 제안한다. 제안하는 ILS-ALOHA 프로토콜은 빈번하게 발생하는 유휴 슬롯을 감지하고 REQ 및 ACK와 같은 제어 정보를 전송함으로써 드론의 접속을 동적으로 제어하고 불필요한 접속을 막아 충돌확률을 낮출 수 있다. 모의실험을 통하여 ILS-ALOHA가 기존 FS-ALOHA 및 DFS-ALOHA 프로토콜 대비 처리율(throughput) 및 지연 성능을 향상시킴을 보인다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 군집드론의 ID 수집 환경에 따른 문제점을 제시한다. III장에서는 드론 ID 식별을 위해 적용 가능한 기존 경쟁 프로토콜 방식을 설명한다. IV장에서는 제안하는 ILS-ALOHA 프로토콜을 자세히 설명한다. V장에서 제안 프로토콜과 기존 프로토콜의 성능을 비교하고, 마지막으로 VI장에서 결론을 맺는다.

II. 드론 ID 수집 환경 및 문제점

그림 1은 REQ-RES 기반의 드론 ID 수집 환경을 보여준다. 먼저 지상국이 드론에게 ID 전송을 요청하

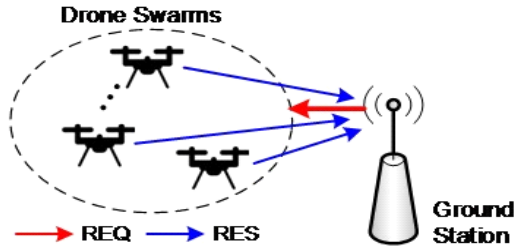


그림 1. Request-response 기반의 드론 ID 수집 환경
Fig. 1. Environment for drone ID collection based on request-response

는 REQ 패킷을 방송하면 이를 수신한 드론은 자신의 ID 값을 기지국으로 전송한다. 이때 드론은 주어진 무선 자원을 랜덤하게 선택하여 데이터를 전송하기 때문에 같은 자원을 선택한 다른 드론과 충돌이 발생할 수 있다. 따라서 접속 충돌을 회피하면서도 자원을 효율적으로 사용하는 MAC 프로토콜의 설계가 필요하다. 이와 같이 REQ-RES 기반으로 데이터를 수집하는 대표적인 시스템인 RFID는 MAC 프로토콜로 slotted ALOHA 방식을 사용하고 있다. 본 논문에서도 저지연과 신뢰성을 보장하는 ID 수집을 위하여 REQ-RES 기반의 slotted ALOHA 프로토콜을 고려한다.

그림 2는 드론 ID 수집을 위하여 slotted ALOHA 프로토콜을 사용할 때의 동작 예를 보여준다. 지상국에서 REQ 패킷을 방송하면 이를 수신한 드론은 자신의 ID 정보를 slotted ALOHA 방식으로 응답한다. 한 슬롯에 동시에 두 개 이상의 드론이 접속하는 경우 충돌이 발생하여 전송에 실패하고, 하나의 드론만 접속하는 경우에만 전송에 성공한다. 반면 드론이 하나도 접속하지 않은 슬롯은 유틸리티 슬롯이 된다. 각 프레임에서 전송에 성공한 드론은 다음 REQ+ACK 패킷에서 성공 여부를 확인하고 전송을 마치게 된다. ID를 전송했으나 ACK를 받지 못한 경우에는 충돌로 판정하고 재전송을 수행한다. 이러한 방식으로 모든 드론의 ID를 수집하면 지상국은 최종적으로 ACK 패킷을 전송하고 수집 절차를 마친다.

드론 식별을 위한 MAC 프로토콜 설계 시 발생할 수 있는 주요 문제점으로 다음 두 가지를 고려한다.

① 지상국-드론 통신 환경에서 ACK 손실 문제

드론의 높은 이동성, 급변하는 드론-지상국간 무선 채널, 드론과의 먼 거리에 따른 전파감쇄로 인하여 지상국에서 드론으로 전송되는 ACK 패킷의 손실이 발생할 수 있다^[11]. 그림 3은 ACK 패킷이 손실될 수 있는 세 가지 경우를 보여준다. 드론은 이동하여 전파

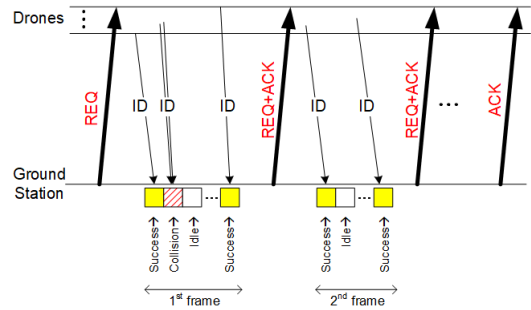


그림 2. 드론 ID 수집을 위한 slotted ALOHA 프로토콜 동작
Fig. 2. Operation of slotted ALOHA protocol for drone ID collection

수신 영역을 벗어나 ACK를 받지 못할 수 있으며, 이 동시 건물, 나무 등의 장애물에 막혀 ACK를 수신하지 못할 수 있다. 또한, 1-5 km 이상 원거리의 드론을 식별해야 하므로 신호 감쇄로 인하여 디코딩에 필요한 충분한 수신 신호세기를 얻지 못할 수 있다.

지상국은 드론으로부터 ID를 수신하면 다음 프레임에서는 ID를 아직 받지 못한 남은 드론 수에 맞게 슬롯 개수를 줄인다. ACK를 정상적으로 수신한 드론은 식별 정보가 전달되었음을 확인하고 전송을 마치지만, 전송에 성공하고도 ACK 수신에 실패한 드론은 재전송을 시도하기 때문에 추가적인 충돌이 발생한다. 따라서 드론 식별 환경에서는 ACK 손실을 고려한 랜덤 접속 프로토콜의 설계가 필요하다.

② Slotted ALOHA 프로토콜의 낮은 효율 문제

군집 드론 ID를 수집하기 위하여 간단하면서도 효과적인 slotted ALOHA 프로토콜을 사용할 수 있다. Slotted ALOHA에서 접속하려는 단말의 개수가 n 이고, 제공되는 슬롯의 개수가 s 로 주어질 때, 임의의 한 슬롯이 유틸리티, 성공, 충돌이 될 확률은 다음과 같이 계산된다^[12].

$$P_{idle} = \binom{n}{0} \left(\frac{1}{s}\right)^0 \left(1 - \frac{1}{s}\right)^n = \left(1 - \frac{1}{s}\right)^n \quad (1)$$

$$P_{succ} = \binom{n}{1} \left(\frac{1}{s}\right)^1 \left(1 - \frac{1}{s}\right)^{n-1} = \frac{n}{s} \left(1 - \frac{1}{s}\right)^{n-1} \quad (2)$$

$$P_{coll} = 1 - P_{idle} - P_{succ} \quad (3)$$

여기에서 성공확률 P_{succ} 는 슬롯 개수가 접속 단말의 수와 동일할 때 (즉, $s = n$) 최대화가 된다. 따

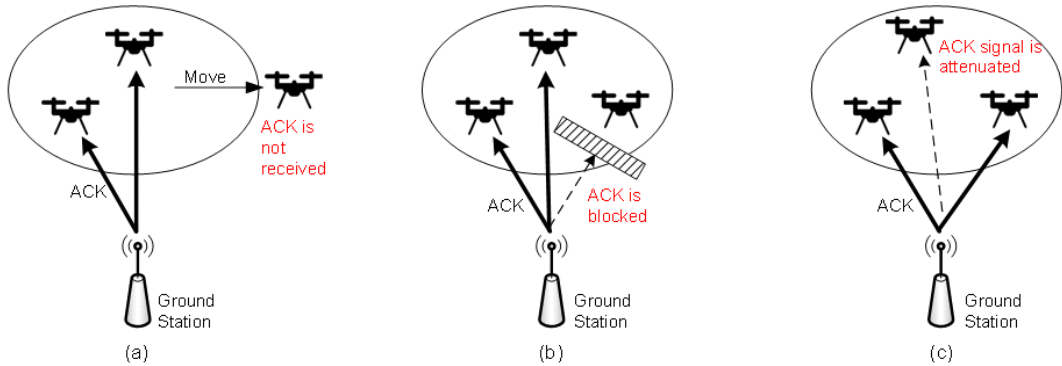


그림 3. 지상국에서 드론에게 전송하는 ACK 패키지의 손실: (a) 이동성으로 인하여 커버리지를 벗어나는 경우, (b) 장애물에 의해 ACK 신호가 단절되는 경우, (c) 먼 거리로 인하여 수신 신호레벨이 낮은 경우
 Fig. 3. Loss of ACK packet transmitted from ground station to drone: (a) out of coverage due to mobility, (b) ACK is blocked by obstacles, and (c) low received signal strength due to long propagation distance

라서 $s = n$ 으로 설정할 때 단말 수 n 의 변화에 따른 각 확률 값은 그림 4와 같다. n 이 증가함에 따라 성공 확률과 idle 확률이 약 $0.37(=1/e)$ 로 같아지며, 충돌 확률은 약 0.26 으로 수렴한다. 이와 같이 slotted ALOHA는 랜덤 접속의 속성으로 인하여 성공 비율이 37% 밖에 안 되며, 전송에 사용되지 않는 유휴 슬롯이 동일하게 높은 비율을 차지함을 알 수 있다. 높은 비율을 차지하는 충돌과 유휴 슬롯은 slotted ALOHA가 낮은 효율을 갖는 주요 원인이므로 slotted ALOHA 방식의 낮은 효율을 개선할 수 있는 방안이 필요하다.

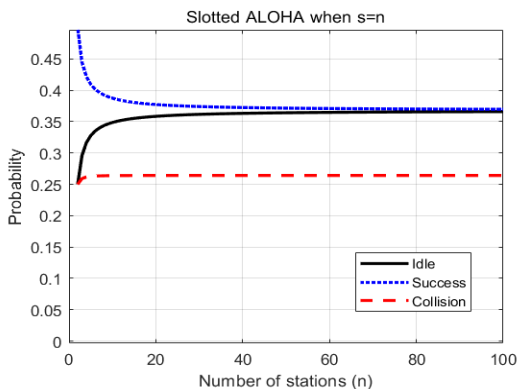


그림 4. Slotted ALOHA에서 단말 수에 따른 확률 값
 Fig. 4. Probability vs. number of stations (n) in slotted ALOHA

III. 기존 연구

드론 식별을 위한 기존 MAC 프로토콜로 framed

slotted ALOHA (FS-ALOHA)와 dynamic FS-ALOHA (DFS-ALOHA)를 고려한다⁹⁾. 이 두 프로토콜은 기본 slotted ALOHA 방식을 프레임화 하여 프레임 시작에 데이터 전송을 요청하는 제어 메시지를 보내고 프레임 내에 데이터 전송을 위한 다수의 슬롯을 제공한다. 프레임 내 슬롯 개수를 고정으로 하느냐 또는 동적으로 변화시키느냐에 따라 FS-ALOHA와 DFS-ALOHA로 구분된다.

3.1 FS-ALOHA 프로토콜

그림 5는 FS-ALOHA의 동작을 보여준다. 각 프레임은 여러 개의 슬롯들로 구성되며, 프레임 당 슬롯 개수는 시스템 파라미터로 초기에 고정 값으로 설정된다. 프레임의 첫 번째 슬롯에서는 REQ 패킷 또는 REQ와 ACK가 합쳐진 REQ+ACK 패킷과 같은 제어 패킷이 기지국에서 단말로 전송된다. REQ 패킷에는 데이터 전송을 요청하는 메시지와 함께 프레임을 구성하는 슬롯 개수 정보가 들어있고, ACK 패킷에는 이전 프레임에서 전송했던 데이터들에 대한 수신 여부를 알려주는 표시(indication) 정보가 들어있다. 이 REQ 패킷을 수신한 단말들은 해당 프레임에서 제공하는 슬롯의 개수를 확인하고 이들 중 랜덤하게 하나를 선택하여 해당 슬롯에서 데이터를 전송한다. 각 슬롯은 접속 유무 및 접속 단말 수에 따라 idle, 성공, 충돌 슬롯이 된다. FS-ALOHA는 매 프레임 당 같은 수의 슬롯을 할당하기 때문에 프레임이 지날수록 성공한 단말들은 더 이상 접속을 시도하지 않기 때문에 유휴 슬롯이 증가할 수 밖에 없다. 따라서 드론 ID 수집과 같이 전송에 성공한 단말이 더 이상 전송을 하지 않는(muting) 경우에는 슬롯 개수를 조절하지 않아 심

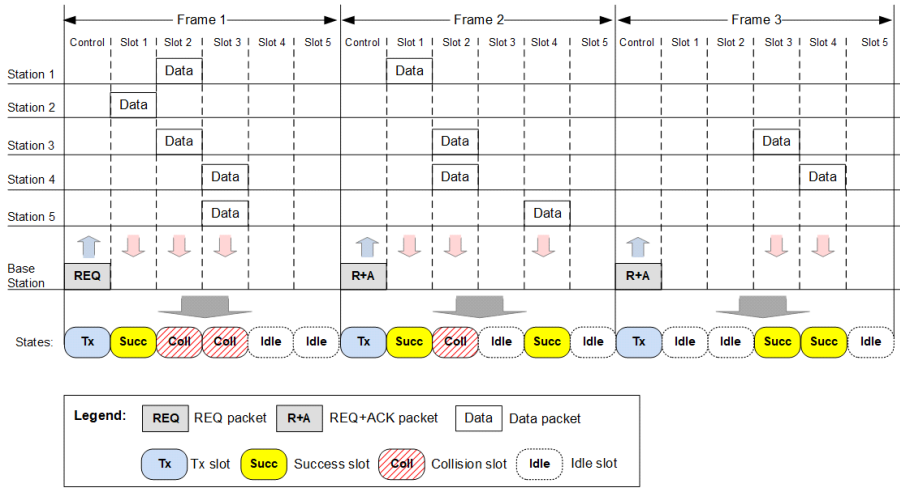


그림 5. FS-ALOHA 프로토콜의 동작
Fig. 5. Operation of FS-ALOHA protocol

각한 자원 낭비가 발생한다.

3.2 DFS-ALOHA 프로토콜

그림 6은 DFS-ALOHA의 동작을 보여준다. DFS-ALOHA는 FS-ALOHA에서 발생하는 자원 낭비 문제를 해결하기 위하여 접속 단말 수에 따라 프레임 당 슬롯 개수를 동적으로 조절한다. DFS-ALOHA 프로토콜은 이전 프레임에서 발생한 idle, 성공, 충돌 슬롯의 개수를 기반으로 다음번 접속 단말 수를 추정하여 다음 프레임의 슬롯 개수를 변경한다. 그림 6에서 보듯이 처음에는 3개의 슬롯이 제공되었는데 충돌

이 많이 발생하여, 다음 프레임에서는 5개의 슬롯으로 슬롯 개수를 증가시킨다. 이후 두 번째 프레임에서 충돌이 줄어들고 유휴 슬롯이 많이 발생하므로 세 번째 프레임에서는 4개의 슬롯으로 슬롯 개수를 감소시킨다. 이와 같이 매 프레임마다 슬롯 개수를 변경함으로써 전송 성공 후 데이터를 더 이상 전송하지 않는 식별 환경에서 자원 낭비를 줄일 수 있다. 이전 프레임에서 발생하는 성공, 충돌, 유휴 슬롯을 기반으로 슬롯 개수를 결정하는 다양한 알고리즘이 제안되어 있다^{9,13)}. 이 알고리즘들은 아직 전송에 성공하지 못한 단말 수를 추정하여 다음 프레임에서 이 단말 수만큼

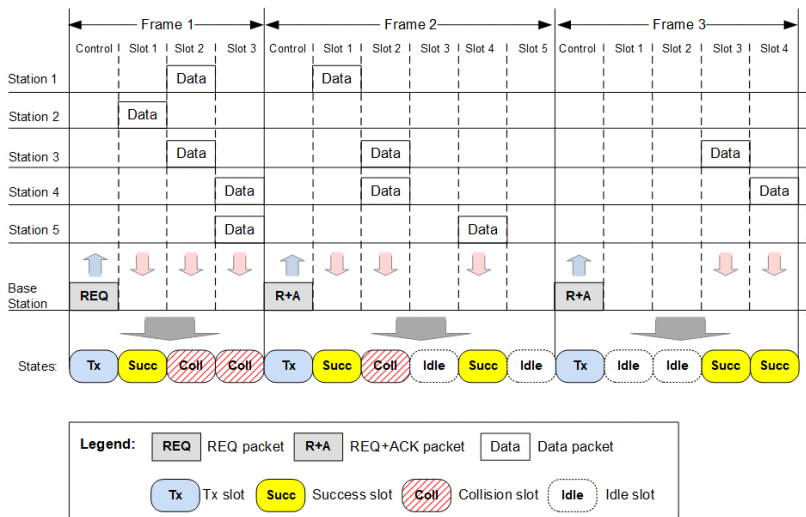


그림 6. DFS-ALOHA 프로토콜의 동작
Fig. 6. Operation of DFS-ALOHA protocol

슬롯을 할당한다. 만약 사전에 셀 내 전체 단말의 수 (n)를 알고 있다면 다음 프레임의 최적 슬롯의 개수는 'n-성공단말 수'로 설정된다.

아울러 드론의 다양한 임무에 따라 이를 지원하는 다양한 MAC 프로토콜이 제안되었다. 이러한 드론 MAC 프로토콜은 크게 Code Division Multiple Access (CDMA), Time Division Multiple Access (TDMA), Carrier Sense Multiple Access (CSMA), Hybrid 기반으로 나누어진다. [14]에서는 다중 홉 공중 네트워크 환경에서 라우팅 프로토콜의 효율성을 증대시키기 위한 TDMA 기반 MAC 프로토콜을 제안하였다. TDMA의 시간 동기화를 위해 GPS 정보를 기본적으로 사용하면서 더 정교한 시간 동기화 과정을 제안하였다. [15]에서는 전방향 안테나를 활용한 CSMA/CA 기반 프로토콜을 제안하였다. 한 안테나를 제어 메시지 전송을 위하여 전용으로 사용하며, Busy-To-Send 제어 메시지를 활용하여 전방향 안테나의 문제점인 Deafness 문제를 해결한다. [16]에서는 TDMA와 CSMA를 결합한 프로토콜을 제안하여 드론은 이웃 프레임 정보를 통해 비어 있는 타임 슬롯이 존재하는 것을 확인한 뒤, 채널 접속을 시도하고 자원을 할당받는다. 이웃 프레임 정보를 유지하기 위해서는 주기적인 제어 메시지 교환을 수행한다. [17]에서는 CSMA와 TDMA를 결합한 MAC 프로토콜로, 마스터 드론은 n 개의 타임 슬롯으로 구성된 Aggregated Request to Send (ARTS)를 통해, 접속 드론에서 전송한 RTS 프레임을 저장하고, Aggregated Clear to Send (ACTS)를 방송하여 각 드론에게 전달한다. 이러한 사전 동작을 통해 드론의 RTS 프레임 충돌을 감소시켜 빠른 데이터 전송을 가능하게 한다.

IV. 제안하는 Idleless Slotted ALOHA 프로토콜

Slotted ALOHA에서 발생하는 유휴 슬롯은 송수신에 사용되지 않기 때문에 전송 프레임의 처리율을 낮추는 주요 요인이 된다. 따라서 본 연구에서는 slotted ALOHA에서 상당 부분을 차지하는 유휴 슬롯을 인지하고 활용하는 방법을 제안한다. 제안 방안에서 지상국은 idle을 슬롯 초기에 감지하고, 남은 유휴 슬롯 기간 동안 갱신된 제어정보(자원할당 정보, 접속확률 정보 및 ACK 정보 등)를 셀 내에 방송한다. 따라서 발생하는 유휴 슬롯마다 새로운 접속 제어 정보가 전달되어 단말의 접속 성공 확률을 증가시키고, ACK 손실이 발생하는 환경에서 ACK 수신 확률을 높일 수 있다. 제안 프로토콜은 idle이 발생하면 더 이상 유휴

슬롯이 되지 않도록 제어정보 전송에 활용하기 때문에 idle-less slotted ALOHA (ILS-ALOHA)라고 명명된다.

4.1 ILS-ALOHA 프로토콜의 동작

그림 7은 제안하는 ILS-ALOHA 프로토콜의 동작을 보여준다. 지상국은 전송 프레임을 제공하고 프레임은 여러 개의 슬롯으로 나누어진다. 전송의 시작에서 제일 첫 번째 슬롯은 지상국에서 드론으로 REQ 패킷을 전송하는데 사용되며, 나머지 슬롯은 기본적으로 드론이 지상국에게 데이터 패킷을 전송하는 용도로 제공된다. REQ 패킷에는 프레임에서 제공하는 슬롯 개수 또는 드론의 접속 확률(p)이 포함되어 드론의 접속을 제어할 수 있다. 드론이 REQ 패킷을 수신하면, 드론은 제공되는 슬롯 수를 파악하고 이들 중 하나를 랜덤하게 선택하여 데이터를 전송한다.

데이터가 전송되지 않는 idle이 발생하면 지상국은 이를 슬롯 초기에 감지한다. 즉, 지상국은 각 슬롯의 시작에서 일정 시간 동안 신호가 검출되지 않으면 이를 idle로 판단하고 즉시 제어 패킷의 송신을 시작한다. 제어 패킷에는 REQ와 ACK 정보가 함께 전송된다. REQ에는 랜덤 접속을 위한 슬롯 개수 또는 접속 제어 확률 값을 포함한다. 지상국에서 데이터(즉, ID)를 전송하는 전체 드론 수를 알 수 있는 경우에는 성공드론 수를 제외한 남은 드론 수가 REQ에서 알려주는 최적 슬롯 개수가 되며, 최적 접속 제어 확률 값(p)은 '1/남은 드론 수'가 된다. 반면 ACK는 기존에 접속한 드론들에 대한 전송 성공여부를 알려주며, ACK 손실 확률을 고려하여 cumulative ACK로써 앞서 전송에 성공한 모든 드론들에 대한 정보를 누적하여 알려준다.

ILS-ALOHA 프로토콜에서 드론은 데이터를 보내지 않는 모든 슬롯에서 지상국으로부터 제어정보가 오는지를 항상 확인한다. 지상국으로부터 제어 정보를 수신한 드론은 이를 기반으로 제공되는 슬롯 중 하나를 랜덤하게 선택하여 데이터를 전송한다. 또는 REQ 정보로써 접속 제어 확률 값이 제공되면 드론은 접속 확률 값에 따라 각 슬롯에서 데이터 송신 여부를 확률적으로 결정한다. 데이터를 전송한 드론은 다음 제어 패킷에서 ACK 정보를 확인한다. 에러 없는 ACK를 수신한 드론은 전송에 성공했음을 확인하고 전송할 데이터가 없으면 전송을 끝낸다. 전송할 데이터가 남아있거나, ACK에 에러가 발생하여 ACK 정보를 제대로 확인하지 못한 드론은 데이터 전송에 실패했다고 판단하고 다음 프레임에서 데이터를 재전송한다.

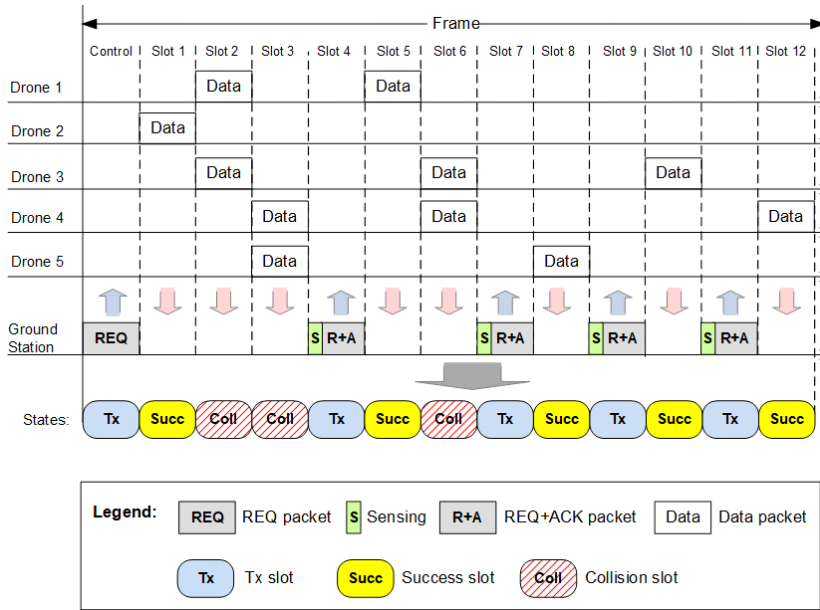


그림 7. 제안하는 ILS-ALOHA 프로토콜의 동작
Fig. 7. Operation of the proposed ILS-ALOHA protocol

이와 같이 지상국은 유티 슬롯이 발생할 때마다 제어 정보를 전송하기 때문에 기존 slotted ALOHA 프로토콜보다 빈번하게 제어 정보를 알려줄 수 있다. 이를 통하여 드론의 랜덤 접속 제어를 보다 정확하게 수행할 수 있다. 또한 드론은 유티 슬롯마다 ACK를 수신함으로써 ACK 손실이 발생하는 경우에도 ACK 수신률을 높일 수 있다.

그림 8은 지상국의 동작 순서도를 보여준다. 지상국은 REQ 패킷 전송 전 제공하는 슬롯의 개수 또는 드론의 접속 확률 값을 결정한다. 이후 프레임의 맨 처음에 이 값들을 포함한 REQ 패킷을 전송한다. 다음 슬롯부터 드론으로부터의 데이터를 수신할 수 있는데, 만약 데이터를 수신하게 되면 이를 받아들이고 디코딩을 한 후 디코딩에 성공한 경우에만 해당 드론의 데이터에 대한 ACK 정보를 갱신한다. 만약 지상국이 모든 드론으로부터 데이터를 수신했으면 마지막으로 ACK 패킷을 전송하고 동작을 종료하게 된다. 모든 드론으로부터 데이터를 수신하지 않았다면 다음 슬롯에서 데이터의 수신을 더 기다린다. 만약 어떤 슬롯에서 데이터를 수신하지 않았다면(즉, 해당 슬롯이 유티 슬롯이라면) 앞에서 받았던 데이터들의 디코딩 성공 및 실패 개수(즉, 이전 수신 데이터의 성공 또는 충돌 개수)를 기반으로 제공 슬롯 수 또는 접속 확률 값을 새롭게 결정하여 REQ 패킷을 만든다. 다음으로 남은 유티 슬롯 구간에서 REQ와 ACK 정보가 같이 포함

된 REQ+ACK 패킷을 전송한다.

그림 9는 드론의 동작 순서도를 보여준다. 드론은

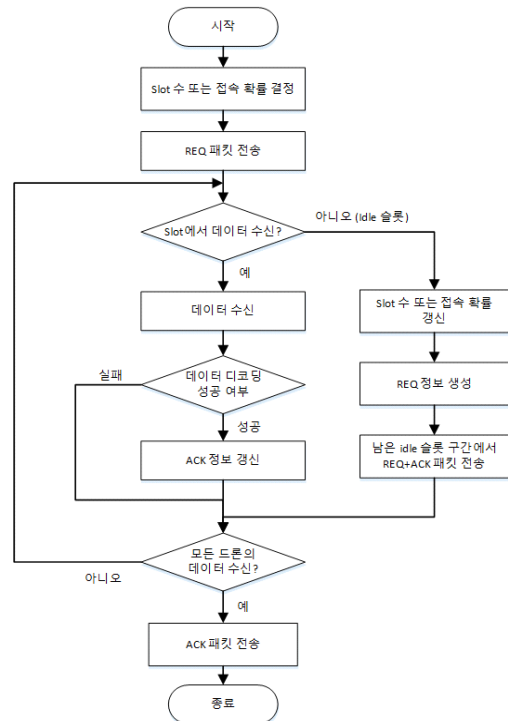


그림 8. 지상국의 동작 순서도
Fig. 8. Flow chart of ground station

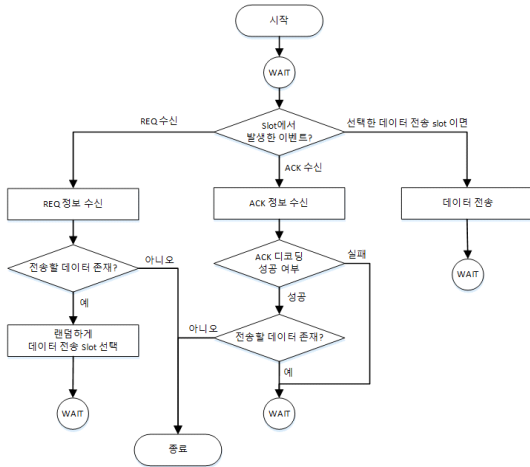


그림 9. 드론의 동작 순서도
Fig. 9. Flow chart of drone

시작 후 WAIT 상태에서 각 슬롯에서 발생한 이벤트에 따라 행동한다. REQ를 수신한 경우에는 전송할 데이터가 존재하는 경우에 랜덤하게 데이터를 전송할 슬롯을 선택한 후 다시 WAIT 상태로 천이한다. 이미 데이터를 전송해서 전송할 데이터가 없는 경우에는 동작을 종료한다. ACK 정보를 수신한 경우에는 ACK가 성공적으로 디코딩된 경우에 전송할 데이터가 더 이상 없으면 종료하고, ACK 디코딩에 실패하거나 전송할 데이터가 남아 있으면 WAIT 상태로 천이한다. 해당 슬롯이 데이터를 전송하려고 선택한 슬롯이면 데이터를 전송하고 WAIT 상태로 천이한다.

4.2 유휴 슬롯의 감지 및 사용

ILS-ALOHA에서 유휴 슬롯의 감지 후 사용 가능한 시간은 매우 중요하다. 그림 10은 지상국에서 유휴 슬롯의 감지 및 제어정보 전송 동작의 타이밍을 보여준다. 지상국은 매 슬롯의 시작에서 에너지 감지 (energy detection) 또는 특징 감지(feature detection) 방식을 사용하여 드론 신호의 수신 여부를 판단할 수 있다. 신호 감지 기준에 따라서 수신 파워가 일정 값 이하가 되거나, 드론이 전송하는 신호의 특징이 발견되지 않으면 현재 슬롯에서 전송되는 신호가 없다고 판단하고 유휴 슬롯으로 간주한다. 이렇게 판단된 유휴 슬롯의 나머지 구간에서는 이전에 성공적으로 전송되었던 데이터 패킷을 기반으로 갱신된 REQ와 ACK 메시지를 전송한다.

그림 10에서 슬롯 시간(T_{slot}), 전파 시간(T_{prop}), 센싱 시간(T_{sens}), 수신에서 송신으로의 스위칭 시간

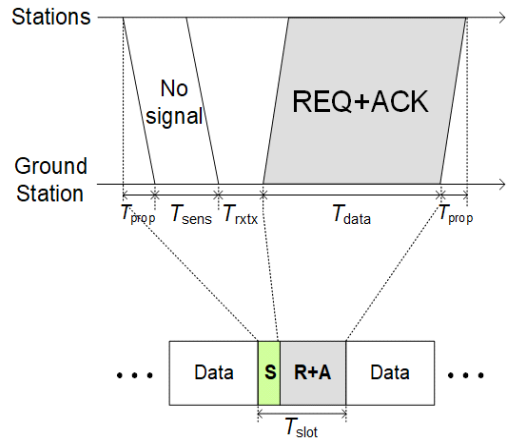


그림 10. 지상국에서 유휴 슬롯의 감지 및 제어 정보 전송 동작의 타이밍
Fig. 10. Timing of idle slot detection and control information transmission in ground station

(T_{rxtx})을 고려할 때 한 유휴 슬롯에서 사용 가능한 제어정보의 송신 시간(T_{data})은 다음과 같이 결정된다.

$$T_{data} = T_{slot} - 2T_{prop} - T_{sens} - T_{rxtx} \quad (4)$$

현실적인 시간 값으로 $T_{slot} = 1 \text{ ms}$, $T_{sens} = 15\mu\text{s}$, $T_{rxtx} = 4\mu\text{s}$ 를 고려할 때^[18] 지상국과 드론간의 거리에 따라 유휴 슬롯에서 이용 가능한 데이터 전송시간 T_{data} 는 그림 11과 같다. 보너바와 같이 $T_{slot} = 1$

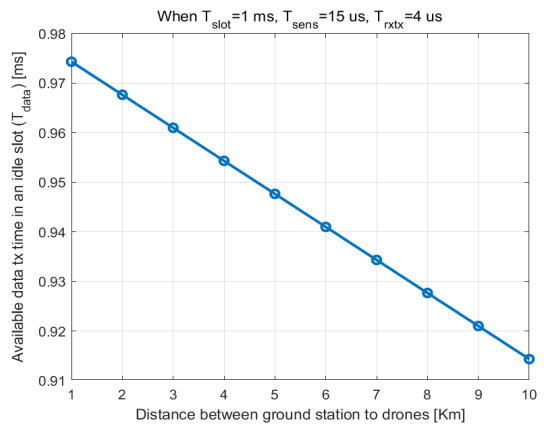


그림 11. 지상국과 드론의 거리에 따른 유휴 슬롯에서 이용 가능한 데이터 전송 시간 ($T_{slot}=1 \text{ ms}$, $T_{sens}=15\mu\text{s}$, $T_{rxtx}=4\mu\text{s}$ 일 때)
Fig. 11. Available data transmission time in idle slot vs. distance between ground station and drone when $T_{slot}=1 \text{ ms}$, $T_{sens}=15\mu\text{s}$, and $T_{rxtx}=4\mu\text{s}$

ms 인 경우에 $T_{data} = 0.914\sim 0.974$ ms로 결정되며, 슬롯의 92~97% 수준의 충분한 시간을 제어 정보를 송신하는데 사용할 수 있음을 알 수 있다.

V. 성능 평가

충돌확률, 처리율, 지연 측면에서 제안 ILS-ALOHA와 기존 FS-ALOHA 및 DFS-ALOHA 프로토콜의 성능을 비교한다. 충돌확률은 제공되는 전체 슬롯 중에서 충돌이 발생한 슬롯의 비율, 처리율은 제공되는 전체 슬롯 중에서 데이터 전송에 성공한 슬롯의 비율, 지연은 모든 드론의 데이터(즉, ID)를 성공적으로 전송할 때까지 걸린 시간으로 정의된다. 시뮬레이션에서 사용한 파라미터로 드론의 전체 개수(n)는 5-100 사이에서 변경되며, ACK 손실 확률 값(q)은 0-0.9 사이에서 변화한다. q 값이 클수록 ACK 손실이 빈번해져 접속 단말 수가 증가하므로 충돌이 증가할 수 있다. 본 연구에서는 무선 채널의 영향을 제외한 접속 충돌을 기반으로 성능을 도출하여 주어진 고정 q 값을 사용한다. 각 성능 지표는 10,000번의 시뮬레이션을 수행한 결과의 평균값에 해당된다^[8].

시뮬레이션에 사용한 환경 및 가정은 다음과 같다. 먼저 지상국은 식별하고자 하는 드론의 전체 개수(n)를 알 수 있다고 가정한다. 이는 별도의 레이더 장비를 통하여 군집 드론을 발견하고 드론의 전체 개수를 확인할 수 있기 때문에 현실적인 가정이 될 수 있다. 이를 통해 지상국에서는 드론의 전체 개수를 알기 때문에 성공한 단말의 수를 제외한 남은 단말의 수를 알 수 있다. 따라서 REQ 패킷에서 알려주는 제공 슬롯 개수는 남은 단말 수와 동일하게 설정된다. 만약 REQ에서 접속 확률 값(p)을 알려주는 경우에는 '1/남은 단말 수'로 설정한다. 반면 FS-ALOHA의 경우 모든 프레임에서 n개의 고정 슬롯 개수를 제공한다. 아울러, 무선 채널의 특성으로 인한 채널 에러는 발생하지 않는다고 가정한다. 일반적으로 랜덤 접속 프로토콜에서는 충돌에 의한 에러만을 고려하므로 여기에서도 두 단말이 동시에 접속하여 충돌이 발생할 때만 데이터 수신에 실패한다고 가정한다. 또한 숨겨진 단말(hidden station)은 없다고 가정한다. 지상국에서는 군집 드론을 향해 제어 신호를 보내면 해당 모든 드론은 지상국으로부터 신호를 받고, 이에 따라 드론들이 응답 신호를 전송하면 지상국은 이 응답 신호를 빠짐없이 받을 수 있다고 가정한다.

그림 12는 ACK 손실 확률 q=0, 0.1, 0.2 일 때 드

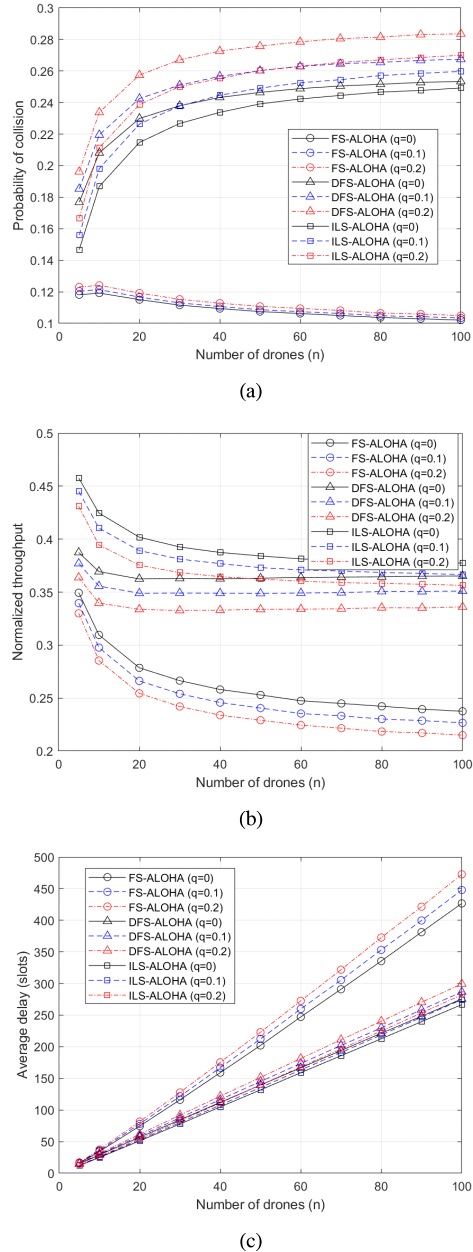


그림 12. 드론 수에 따른 충돌확률(a), 처리율(b), 지연(c) 성능 (q=0, 0.1, 0.2 일 때)
Fig. 12. (a) Probability of collision, (b) normalized throughput, and (c) delay vs. number of drones when q=0, 0.1, and 0.2

론 수에 따른 충돌확률, 처리율, 지연 성능을 보여준다. 드론 수가 증가함에 따라 DFS-ALOHA와 ILS-ALOHA 방식은 충돌확률이 증가하다가 일정 수준을 유지한다. 반면 FS-ALOHA는 드론 수가 증가함에 따라 오히려 충돌확률이 감소하는데, FS-ALOHA

는 전체 드론 수와 동일한 슬롯 개수를 제공하지만 시간이 지날수록 성공 드론이 증가하면서 실제 접속 드론 수가 감소하기 때문이다. 이로 인하여 처리율 성능의 경우 FS-ALOHA가 현저히 낮음을 확인할 수 있다. 처리율 측면에서 제안하는 ILS-ALOHA가

DFS-ALOHA 보다 더 높은 성능을 갖는다. ILS-ALOHA는 유휴 슬롯을 사용하여 제어 정보를 전송하므로 DFS-ALOHA와 같이 별도의 제어 슬롯을 할당하지 않아도 되기 때문이다. 또한 유휴 슬롯마다 제공 슬롯 개수를 동적으로 변경하여 보다 동적으로 접속 제어를 수행하기 때문에 충돌확률이 낮아지기 때문이다. 아울러 두 프로토콜 간의 처리율의 차이는 ACK 손실 확률이 증가함에 따라 증가하게 되는데, 이는 ILS-ALOHA가 DFS-ALOHA 보다 더 빈번하게 ACK를 전송하기 때문에 ACK 손실 환경에서 ACK 수신률이 높기 때문이다. 지연 측면에서도 처리율과 마찬가지로 이유로 제안 ILS-ALOHA가 기존 FS-ALOHA와 DFS-ALOHA 보다 낮은 지연을 갖는다.

그림 13은 드론 수 $n=50, 100$ 일 때 ACK 손실 확률에 따른 충돌확률, 처리율, 지연 성능을 보여준다. ACK 손실 확률이 증가할수록 충돌확률은 기하급수적으로 증가하게 된다. 이는 지상국이 ACK를 전송함에도 불구하고 ACK를 제대로 못 받은 드론들이 재전송을 수행하기 때문이다. 기본적으로 FS-ALOHA는 제공하는 슬롯 개수가 고정으로 유지되기 때문에 충돌확률이 다른 두 프로토콜에 비하여 낮게 나온다. 하지만 ILS-ALOHA는 유휴 슬롯이 발생할 때마다 cumulative ACK를 반복적으로 보내므로 DFS-ALOHA 보다는 낮은 충돌확률을 가진다. 처리율 측면에서 ILS-ALOHA가 가장 좋은 성능을 보이며 ACK 손실 확률이 증가할수록 그 차이가 더 두드러짐을 알 수 있다. 따라서 ACK 손실이 큰 환경일수록 ACK 정보를 더 자주 보내는 ILS-ALOHA가 유리함을 알 수 있다. 처리율과 마찬가지로 지연 성능도 ILS-ALOHA가 다른 두 방식보다 더 낮은 값을 가지며 ACK 손실 확률이 증가할수록 더 이득이 커짐을 볼 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 소형드론 식별을 위한 무선통신 MAC 프로토콜 연구를 수행하여 드론 환경에서 ACK 손실 문제와 기존 slotted ALOHA의 유휴 슬롯에 의한 비효율성 문제를 고려하여 ILS-ALOHA 프로토콜을 제안하였다. 제안하는 ILS-ALOHA는 추가적인 자원 할당 없이 제어 정보를 유휴 슬롯에서 전송함으로써 전송 자원을 보다 효율적으로 사용할 수 있다. 또한, 빈번하게 발생하는 유휴 슬롯에서 보다 동적으로 접속 제어 정보를 전송함으로써 드론의 충돌확률을

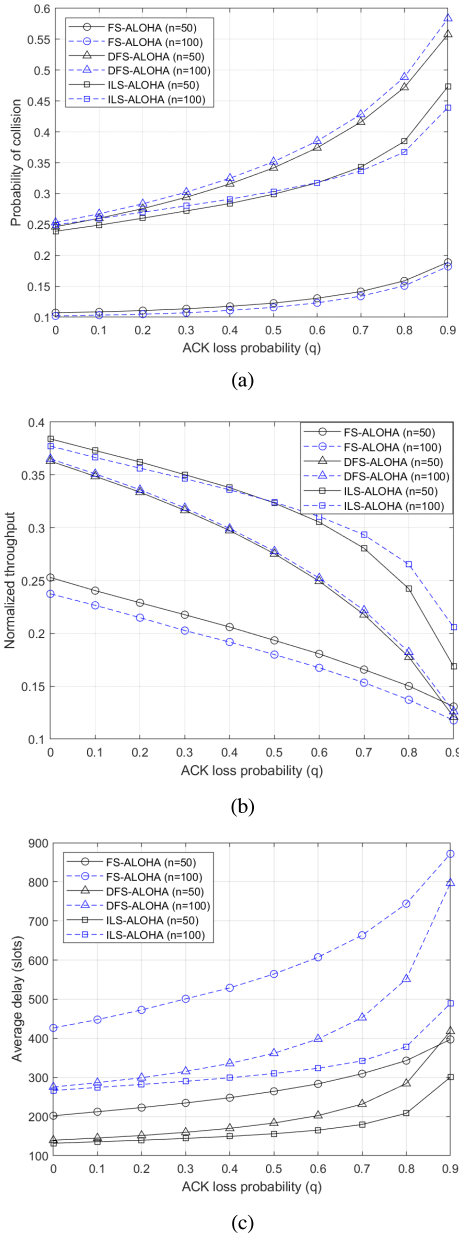


그림 13. ACK 손실 확률에 따른 충돌확률(a), 처리율(b), 지연(c) 성능 ($n=50, 100$ 일 때)
 Fig. 13. (a) Probability of collision, (b) normalized throughput, and (c) delay vs. ACK loss probability when $n=50$ and 100

낮추고 처리율을 높일 수 있다. 아울러, 유휴 슬롯마다 ACK를 전송함으로써 ACK 손실이 발생하는 환경에서 ACK 수신률을 높임으로써 드론의 불필요한 재접속을 막아 충돌확률을 낮추고 처리율 및 지연 성능을 향상시킬 수 있다. 향후에는 실제 드론이 운용되는 무선 채널환경에서 드론의 위치 및 이동성에 따라 채널 오류를 반영하여 성능을 도출하고 프로토콜을 개선할 계획이다.

References

- [1] K.-M. Kang, et al., "Trends in low altitude small drone identification technology and standardization," *Electron. and Telecommun. Trends*, DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2019.J.340615>, 2019.
- [2] UAS-ID ARC, "*UAS identification and tracking aviation rulemaking committee*," ARC recommendations final report, pp. 1-96, 2017.
- [3] EASA, "On unmanned aircraft systems and on third-country operators of unmanned aircraft systems," *Official J. European Union (EU)*, vol. 2019, no. 945, pp. 1-71, 2019.
- [4] http://www.ieee802.org/11/PARs/P802_11be_PAR_Detail.pdf
- [5] <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3527>
- [6] <https://www.rtca.org/content/drone-advisory-committee/>
- [7] L. Gupta, R. Jain, and G. Vaszkun. "Survey of important issues in UAV communication networks," *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 18, no. 2, pp. 1123-1152, Nov. 2015.
- [8] H.-H. Choi, H. Lee, and K.-M. Kang, "Idleless slotted ALOHA protocol for drone swarm identification," *KICS Winter Conf. 2020*, vol. 71, no. 1, pp. 581-582, Feb. 2020.
- [9] D. K. Klair, K. W. Chin, and R. Raad, "A survey and tutorial of RFID anti-collision protocols," *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 12, no. 3, pp. 400-421, Apr. 2010.
- [10] J.-W. Cho, "MAC protocol technology trends for UAV networks," *J. KICS*, vol. 42, no. 6, pp. 1216-1224, Jun. 2017.
- [11] D. W. Matolak and R. Sun, "Unmanned aircraft systems: Air-ground channel characterization for future applications," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 10, no. 2, pp. 79-85, Jun. 2015.
- [12] E. Felemban, "Performance analysis of RFID framed slotted Aloha anti-collision protocol," *J. Comput. and Commun.*, vol. 2, no. 1, pp. 13-18, Jan. 2014.
- [13] Q. Tong, et al., "Bayesian estimation in dynamic framed slotted ALOHA algorithm for RFID system," *Comput. & Math. with Appl.*, vol. 64, no. 5, pp. 1179-1186, Sep. 2012.
- [14] L. R. Pinto, A. Moreira, L. Almedia, and A. Rowe, "Characterizing multihop aerial networks of COTS multirotors," *IEEE Trans. Ind. Info.*, vol. 13, no. 2, pp. 898-906, Apr. 2017.
- [15] S. Temel and I. Bekmezci, "LODMAC: location oriented directional MAC protocol for FANETs," *Comput. Netw.*, vol. 83, pp. 76-84, Jun. 2015.
- [16] A. Jiang, Z. Mi, C. Dong, and H. Wang, "CF-MAC: a collision-free MAC protocol for uavs ad-hoc networks," in *Proc. IEEE WCNC 2016*, Doha, Qatar, Apr. 2016.
- [17] S. Say, H. Inata, and S. Shimamoto, "A hybrid collision coordination-based multiple access scheme for super dense aerial sensor networks," in *Proc. IEEE WCNC 2016*, Doha, Qatar, Apr. 2016.
- [18] IEEE 802.11a-1999, "*IEEE Standard for Telecommunications and Information Exchange Between Systems - LAN/MAN Specific Requirements - Part 11: Wireless Medium Access Control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: High Speed Physical Layer in the 5 GHz band*"

최 현 호 (Hyun-Ho Choi)



2001년 2월: KAIST 전기 및
전자공학과 졸업

2003년 2월: KAIST 전기 및
전자공학과 석사

2007년 2월: KAIST 전기 및
전자공학과 박사

2007년 3월~2011년 2월: 삼성
종합기술원 전문연구원

2011년 3월~현재: 국립한경대학교 ICT로봇기계공학
부 ICT로봇공학전공 교수

<관심분야> 이동통신시스템, 매체접속제어, 분산 네
트워크, 저전력 통신, 무선전력전송, 생체모방 알
고리즘

[ORCID:0000-0002-6785-2596]

강 규 민 (Kyu-Min Kang)



1997년 2월: 포항공과대학교 전
자전기공학과 (공학사)

1999년 2월: 포항공과대학교 전
자전기공학과 (공학석사)

2003년 2월: 포항공과대학교 전
자전기공학과 (공학박사)

2003년 8월~현재: 한국전자통
신연구원 책임연구원

<관심분야> 드론식별, 비면허주파수 이용, 통신 시스템
설계 및 이론

[ORCID:0000-0002-6785-2596]

이 호 원 (Howon Lee)



2003년 2월: KAIST 전자전산
학과 졸업

2009년 8월: KAIST 전기 및
전자공학과 박사 (석박사통
합)

2009년 6월~2010년 2월: KAIST
IT융합연구소 선임연구원

2010년 3월~2012년 2월: KAIST IT융합연구소 팀
장/연구조교수

2012년 3월~현재: KAIST IT융합연구소 겸직교수

2012년 3월~현재: 국립한경대학교 전자전기공학부
전자공학전공 부교수

<관심분야> 5G/6G 모바일 네트워크, 무선자원관리,
드론 통신, 머신러닝기반 통신 네트워크, 3D 비
디오 통신

[ORCID:0000-0001-5509-9202]