

# 무인로봇체계에서 QoS 보장을 위한 트래픽 방향 기반 중앙집중식 TDMA 슬롯 할당 기법

한지나\*, 김다빈\*, 고영배°, 권대훈\*\*

## Centralized TDMA Slot Assignment Scheme Based on Traffic Direction for QoS Guarantee in Unmanned Robot Systems

Jina Han\*, Dabin Kim\*, Young-Bae Ko°, DaeHoon Kwon\*\*

### 요약

본 논문은 무인로봇을 활용하는 군 정찰 환경에서 발생하는 트래픽 속성을 고려한 슬롯 할당 기법을 제안한다. 전장 지역을 탐지하고 적으로부터의 위협을 사전에 확인하기 위해 사람을 투입하는 것 대신 점차 무인로봇이 그 역할을 대신할 것으로 예상된다. 관제센터가 무인로봇을 조종하기 위해 전송하는 제어메시지의 경우, 한 번의 오작동이 큰 비극을 낳을 수 있기 때문에 고 신뢰성이 요구된다. 또한 각 무인로봇들이 감시정찰을 위해 관제센터로 전송하는 정찰용 멀티미디어 데이터의 경우, 실시간으로 끊김없는 영상을 제공하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 이러한 무인로봇 환경의 요구사항을 고려하여 효과적인 데이터 전송을 보장하기 위해 per-path 기반의 중앙집중식 TDMA 슬롯 할당 기법을 제안하였다. 관제센터가 트래픽 방향을 기반으로 중앙집중식으로 슬롯을 할당함으로써 무인로봇들 간의 슬롯 할당 충돌을 감소시키고 전송 지연을 감소시킨다. 본 제안 기법은 ns-3 시뮬레이터를 활용하여 성능을 검증하였고 TDMA기반의 비교 알고리즘보다 높은 패킷 전송 성공률을 보였으며 다운링크 트래픽 전송 시나리오에서 비교 알고리즘에 비해 짧은 지연 시간을 보였다.

**Key Words** : Centralized TDMA, Unmanned robot system, Traffic direction, Slot assignment, QoS guarantee

### ABSTRACT

This paper proposes a time slot allocation scheme for military patrol environments. This proposal comes from analysis of traffic properties in a military patrol environment. In the near future, robots are expected to explore enemy grounds and measure threat, taking the place of human patrol. In order to control such robots, control messages must be extremely accurate. One mistake from the control center could cause a tragedy. Thus, high reliability must be guaranteed. Another goal is to maintain a continual flow of multimedia data sent from patrol robots. That is, QoS (Quality of Service) must be guaranteed. In order to transmit data while fulfilling both attributes, the per-path based centralized TDMA slot allocation scheme is recommended. The control center allocates slots to robots allowing synchronization among robots. Slot allocation collisions can also be avoided. The proposed scheme was verified through the ns-3 simulator. The scheme showed a higher packet delivery ratio than the algorithm in comparison. It also performed with shorter delay time in the downlink traffic transmission scenario than the algorithm in comparison.

\* 본 논문은 국방과학연구소의 “그룹 무인로봇체계용 위치기반 진술 MANET 통신/제어 S/W 개발” 과제의 지원을 받아 수행된 연구임

• First Author : Ajou University Department of Computer Engineering, jina@uns.ajou.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Ajou University Department of Computer Engineering, youngko@ajou.ac.kr, 정회원

\* Ajou University Department of Computer Engineering, dabin912@gmail.com

\*\* Agency for Defense Development, Korea, dhkwon@add.re.kr

논문번호 : KICS2015-12-397, Received December 16, 2015; Revised April 1, 2016; Accepted April 8, 2016

## I. 서 론

오늘날 첨단과학 기술과 정보통신기술의 발전은 공공, 민간, 국방 분야를 아우르며 다양한 산업원천기술 개발에 기여하고 국가 기술력의 선진화와 산업 발전을 가속화 하고 있다. 특히 국방 산업 분야에서 과학 기술력의 발전은 미래 전쟁양상인 네트워크 중심전을 실현하는 기반을 마련하고, 정보 교환을 통한 정보 우위를 선점하는데 필요한 전술 통신 체계 구축을 가능하게 한다. 뿐만 아니라 미래전에서 점차 인명을 중시하는 작전 수행 능력이 강조되면서 무인자율화 무기 체계 개발을 통해 아군의 병력 손실을 줄이고 강건한 전술 통신을 보장하는 원천 기술 개발이 중요한 요인으로 대두되고 있다<sup>1,2</sup>.

무인로봇체계는 무인로봇과 이를 통제하는 관제센터(원격제어센터)로 구성된다. 무인로봇은 장착된 임무장비를 통해 사람의 접근이 용이하지 않은 험지 탐사와 전장 지역 감시정찰 등을 수행하고, 수집한 다양한 정보를 관제센터로 전송함으로써 병사의 안전을 확보하고 적으로부터의 위협을 실시간으로 파악하여 작전에 반영할 수 있도록 한다. 이때 관제센터로 전송되는 영상 데이터는 실시간성과 서비스품질(QoS: Quality of Service)이 보장되어야 한다. 관제센터는 무인로봇 운용을 제어하는 중앙 센터로서 무인로봇이 전송하는 정찰 데이터를 수집 및 처리하고 각 로봇의 임무수행을 제어한다. 관제센터는 수집한 감시정찰 영상 데이터를 기반으로 각 무인로봇에 작전 지휘명령을 위한 제어메시지를 전송한다. 이 때 해당 메시지는 실시간성과 고 신뢰성이 보장되어야 한다<sup>3,4</sup>. 이처럼 무인로봇체계에서 실시간 로봇제어 및 멀티미디어 전송의 효율성을 보장하기 위해 네트워크의 링크 자원 이용 효율을 향상시키는 무선자원접근제어 기법 연구가 필요하다.

상용 무선 통신망에서 많이 사용되는 경쟁 기반의 무선자원접근제어 기법인 CSMA(Carrier Sense Multiple Access)는 각 노드가 패킷 전송 전에 채널 사용여부를 감지하고 랜덤 백오프(Backoff)를 통해 경쟁적으로 무선자원에 접근하는 기법이다. CSMA는 구현이 간단하며 확장성과 채널 활용률이 높은 장점이 있지만, 통신에 참여하는 노드의 수와 트래픽 량이 증가할수록 패킷 전송 충돌 확률이 높아지게 된다. 이로 인해 전송 지연시간이 증가하고 중요 데이터가 손실됨으로써 QoS 및 고 신뢰성의 데이터 전송을 보장하기가 어려워지는 한계점이 있다.

비경쟁기반의 무선자원접근제어 기법인 TDMA

(Time Division Multiple Access)는 각 노드에게 상호 배타적인 시간 슬롯을 할당한다. 통신에 참여하는 각 노드는 자신의 매 점유 슬롯에서 비경쟁 기반으로 데이터를 전송하기 때문에 전송 충돌 확률과 지연시간을 매우 효과적으로 감소시킬 수 있다<sup>5</sup>. 종래의 애드혹 네트워크, 센서 네트워크와 같은 다중 홉 기반의 무선 통신 시스템에서는 네트워크 상태 변화에 따라 각 노드의 슬롯 할당 상태를 달리하는 동적 TDMA 기법에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 실시간 데이터 전송의 QoS 보장을 위한 대역폭 요구량에 따른 동적 슬롯 할당기법, 전송 경로 기반(Per-path)의 순차적 다중 홉 슬롯 할당 기법 등은 네트워크 변화에 적응적으로 대처함으로써 그 성능을 향상시켰다<sup>10</sup>.

그러나 기존의 대부분의 연구는 하나의 싱크 노드로 데이터를 전송하는 단방향 트래픽 특성을 주로 고려하거나, 트래픽의 방향성에 대한 고려가 깊이 이루어지지 않았다. 양방향 트래픽의 QoS가 보장되어야 하는 무인로봇체계에서는 이러한 특성에 대한 고려의 부재로 인해 일부 전송 트래픽의 QoS가 저하되고 나아가 네트워크 전체에 대한 신뢰성을 보장하기 어려운 문제가 야기될 수 있다.

본 논문에서는 무인로봇체계에서의 실시간 로봇제어용 데이터의 신뢰성 및 멀티미디어 데이터 전송의 QoS를 효과적으로 보장하기 위한 중앙집중식 TDMA 슬롯 할당기법을 제안한다. 본 논문의 제안 기법은 트래픽의 방향성과 양방향 트래픽에 대한 대역폭 요구량을 고려하여 각 무인로봇에게 동적으로 슬롯을 할당함으로써 미디어 데이터 전송 지연을 줄이고 충돌에 의한 데이터 손실을 감소시킴으로써 전송 효율과 네트워크 성능을 보다 향상시킨다.

## II. 관련연구

본 장에서는 연속된 슬롯 할당과 가용 대역폭 보장을 통해 효율적으로 데이터를 전송하는 기존 TDMA 기법에 대해 설명하고 이들의 한계점 및 본 논문에서 고려하는 무인로봇체계에 적용했을 때 발생 가능한 문제에 대해 분석한다.

TMRR(TDMA-based Multi-hop Resource Reservation)<sup>6</sup>은 무선 애드혹 환경에서 실시간 멀티미디어 데이터의 효율적 전송을 지원하는 기법을 제안한다. MANET 환경에서는 노드의 이동성, 신호감쇄 등으로 인해 데이터 전송 실패 확률이 크게 증가한다. 이 경우 패킷 재전송을 위한 경로 재탐색 등으로 중단간 전송 지연 시간이 증가하게 되는데, 이는 네트

워크의 처리량을 크게 감소시킬 뿐만 아니라 멀티미디어 데이터의 QoS 보장을 어렵게 한다. 이를 해결하기 위해 TMRR은 데이터 송수신 경로 사이에 있는 릴레이 노드들에게 순차적으로 슬롯을 할당하여 실시간 데이터가 끊김없이 전송되도록 함으로써 종단간 전송 지연시간을 감소시켰다. 하지만 무인로봇체계와 같이 관제센터와 각 로봇들이 양방향 트래픽에 대해 각각 일대일 세션을 유지하는 경우, 각 송수신 단말 페어(pair)가 연속적인 슬롯 할당을 위해 전파하는 메시지로 인해 컨트롤 오버헤드가 증가하고 이로 인해 네트워크 성능이 저하되는 문제가 발생할 수 있다.

TreeMAC<sup>[7]</sup>은 센서 노드들이 하나의 싱크 노드로 전송하는 업링크 트래픽에 대해 각 노드의 전송 트래픽 량을 고려하여 채널 접근 기회에 차별성을 둬으로써 종단간 전송지연을 감소시키는 중앙집중식 슬롯 할당 기법을 제안한다. 즉, 지식 노드에 할당된 슬롯수와 자신이 필요로 하는 슬롯수를 합산하여 싱크 노드로 요청하게 된다. 따라서 싱크 노드에 근접할수록 상대적으로 더 많은 슬롯을 할당받게 된다. 싱크 노드는 리프(Leaf)노드에서 전송 시작된 데이터가 싱크 노드까지의 경로를 따라 순차적으로 전달될 수 있도록 스케줄링 하는데, 이러한 접근법은 가능한 하나의 TDMA 프레임 내에서 종단간 트래픽 전송이 완료될 수 있게 한다. 이러한 접근법을 무인로봇 체계에 적용할 경우 업 링크로 전송되는 실시간 미디어 데이터의 경우 관제센터까지 신속하게 전달될 수 있지만, 관제센터에서 전파되는 다운링크 트래픽을 전송하는 데에는 매우 적합하지 않다. 지식 노드가 부모 노드로부터 데이터를 수신하는 시점은, 이미 자신의 데이터를 전송할 시점이 지난 상태이기 때문에 다음 TDMA 프레임까지 기다려야 한다. 이는 다운링크 전송 지연시간을 급격히 증가시키는 문제를 야기한다. 관제센터가 전파하는 제어메시지는 각 무인로봇을 조종하는 중요 메시지가기 때문에 지연 시간에 매우 민감하다. 따라서 업/다운 양방향 트래픽을 함께 고려한 슬롯할당이 이루어지지 않을 경우 무인로봇체계의 성능을 보장하기 어려워진다.

Funneling-MAC<sup>[8]</sup>은 무선 센서 네트워크에서 싱크 노드로 데이터 전송 시 발생하는 패킷 충돌, 혼잡, 손실과 같은 문제점을 해결하기 위해 TDMA와 CSMA를 함께 사용하는 hybrid MAC 기법을 제안한다. 해당 알고리즘은 구역을 나누어 싱크 노드 주변의 특정 구역 내에 존재하는 노드들은 TDMA로 동작하고 그 밖의 노드들은 CSMA로 동작하게 한다. 그 결과, 특정 구역 내 노드들은 슬롯 스케줄링을 통해 가용 대역

폭을 할당받아 대량의 데이터 처리가 가능해진다. 하지만 고 신뢰성을 요구하는 무인로봇의 정찰 환경에서 해당 알고리즘을 적용하였을 때, 경쟁 기반의 CSMA로 동작하는 노드들의 경우, 패킷 충돌 혹은 기아(starvation) 현상이 나타날 수 있으며, 그 결과 네트워크 혼잡 및 공정성(fairness) 저해 문제가 발생할 수 있다.

이와 같이 기존의 대부분의 관련 연구는 노드별 가용 대역폭 보장을 위한 슬롯 할당 기법을 제안하고 있으나 양방향 트래픽 및 전체 슬롯 할당에 소요되는 컨트롤 오버헤드에 대한 고려가 부족하여 무인로봇의 지역 정찰 환경에는 적합하지 않다. 따라서 본 논문은 관제센터와 무인로봇간의 양방향 트래픽의 원활한 송수신을 보장하는 per-path 기반의 중앙집중식 슬롯 할당 기법을 제안한다.

### III. 제안기법

본 논문은 그림 1과 같이 다수의 무인로봇 (UGV: Unmanned Ground Vehicle)들과 하나의 관제센터로 구성된 다중홉 무선 애드혹 환경에서의 TDMA 기법을 제안한다. 각 무인로봇은 주기적으로 자신의 네트워크 상태 정보가 포함된 슬롯 할당요청 메시지를 관제센터로 전송하게 되는데, 이를 수신한 관제센터가 네트워크에 존재하는 모든 무인로봇에 대한 2-홉 연결성 맵 (connectivity map)을 구성하고 이를 기반으로 중앙집중식 슬롯 할당을 수행한다. 이때 관제센터는 각 무인로봇의 슬롯 요청 수, 연결성, 슬롯 충돌 여부, 트래픽 방향성 등을 고려하여 per-path 기반의 업링크와 다운링크 슬롯을 할당한다. 할당된 정보는 네트워크에 전파되어 각 무인로봇들은 자신의 점유슬롯 정보를 갱신한다. 또한 슬롯 할당 과정에서 전송하는 제어메시지에 크기가 작은 컨트롤 패킷을 피기백

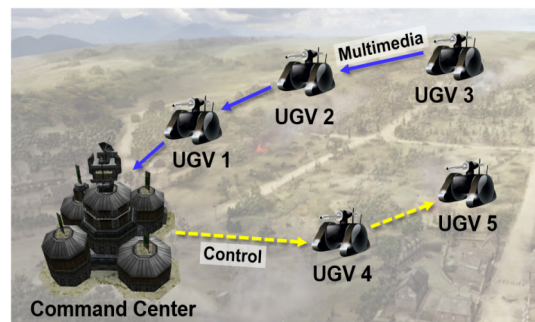


그림 1. 전체 시스템 개요  
Fig. 1. System summary

(piggyback)하여 보냄으로써 추가적인 컨트롤 오버헤드를 줄이고 데이터 전송을 위한 대역폭을 확보한다.

Per-path 기반 슬롯 할당 기법은 데이터 전송 경로에 속한 노드들의 시간 슬롯을 순차적으로 할당함으로써 연속적인 데이터 전송을 지원하는 QoS 보장 접근법이다. 데이터 전송 순서에 따라, 먼저 보내야 하는 무인로봇이 프레임의 앞쪽 슬롯을, 릴레이 노드들이 순서대로 그 다음 슬롯을 할당받을 수 있도록 한다. 또한 관제센터가 전송하는 제어메시지 전송 구간과 무인로봇들이 관제센터로 멀티미디어 메시지를 전송하는 구간을 나누어 양방향 트래픽을 고려한 슬롯 할당이 이루어지도록 설계하였다. 예를 들어, 그림 1에서 UGV 3이 관제센터로 멀티미디어 데이터를 보내기 위해서는 UGV 3, 2, 1의 순서로 슬롯이 할당된다. 또한 관제센터가 UGV 5로 제어메시지를 전송하는 경우에는 관제센터, UGV 4의 순서로 슬롯을 할당받아 끊임없는 데이터 전송이 가능해진다. 본 제안 기법은 성능평가를 통해 양방향 트래픽 전송을 하는데 있어 높은 신뢰성뿐만 아니라 짧은 지연 시간을 보임을 증명하였다.

### 3.1 TDMA 구조

본 논문에서 제안하는 슈퍼프레임은 그림 2처럼 3개의 슬롯 구간을 가진다. 슈퍼프레임의 첫 번째 슬롯 C는 관제센터가 무인로봇들에게 슬롯 할당 정보를 전송하는 관제센터 전용 슬롯이다. 두 번째, 세 번째 슬롯은 관제센터가 무인로봇들을 제어하기 위해 제어메시지를 전송하는 DT(Downlink Traffic) 구간, 무인로봇들이 정찰 데이터를 관제센터로 전송하는 UT(Uplink Traffic) 구간으로 구성된다. 이 때, 무인로봇 간의 프레임 동기는 GPS를 활용한 글로벌 시간동기화를 가정한다. 무인로봇체계에서 사용되는 무인로봇 장비들은 필드에서 활용되는 군용 장비로써 GPS 장착이 가능하다<sup>9)</sup>. 따라서 이를 활용하여 시간 동기화를 보장할 수 있으므로 제안 기법에서는 슬롯 할당 기법에 초점을 맞춘다.

제안 알고리즘은 슬롯 할당 요청을 위한 컨트롤 메시지로 SMOP(Slot-Map Organizing Packet) 을 정의한다. SMOP에는 각 무인로봇의 요청 슬롯 수와 1-홉 이웃 노드의 ID 정보가 포함된다. 표 1은 SMOP의 포



그림 2. 슈퍼프레임 구조  
Fig. 2. Superframe structure

맷과 각 세부 필드를 나타내고 있다. 관제센터는 무인로봇에게 슬롯 할당 정보를 전달하기 위해 CMOP (Central-Map Optimized Packet) 을 전송한다. 관제센터는 슈퍼프레임의 첫 번째 슬롯 C에서 CMOP을 브로드캐스팅한다. 이 메시지를 수신한 로봇들은 자신의 DT 구간 슬롯에서 다시 CMOP을 브로드캐스팅하여 슬롯 할당 정보를 네트워크 전체로 전파한다. 표 2는 CMOP의 포맷과 각 세부 필드를 나타낸다.

표 1. SMOP의 포맷 정의  
Table 1. Format of SMOP

Parameter	Description
Sender ID (4bytes)	Sender node ID
Hop Count (1byte)	Hop count value between sender and command center
Slot demand for DT (1byte)	The number of slots that a node wants to be assigned during DT period
Slot demand for UT (1byte)	The number of slots that a node wants to be assigned during UT period
Neighbor Number (1byte)	The number of 1-hop neighbors
Neighbor Information (variable)	IDs of 1-hop neighbors

표 2. CMOP의 포맷 정의  
Table 2. Format of CMOP

Parameter	Description
Sender ID (4bytes)	Sender node ID
Hop Count (1byte)	Hop count value between sender and command center
Slot Assignment Number (1byte)	The number of slots assigned from command center
Slot Assignment Information (variable)	Information of slot assignment (pair : Node ID/Slot Index)

### 3.2 중앙집중식 슬롯 할당 기법

#### 3.2.1 초기 경쟁기반 슬롯 요청

무인로봇들은 개별적으로 관제센터에 초기 슬롯을 요청한다. 네트워크 초기 구성 단계에서는 슈퍼프레임 구조가 설정되어 있지 않아 그림 3의 ①번 단계와 같이 관제센터가 CMOP을 전파하며 시작한다. 초기에는 할당할 슬롯 정보가 존재하지 않으므로 관제센터의 ID와 Hop Count만이 설정된 CMOP이 전파된다.

관계센터로부터 CMOP을 수신한 노드들은 패킷의 Hop Count를 1씩 증가시키고 다시 전파함으로써 관계센터와의 홉 수를 파악한다. 이 때, 그림 3의 ②, ③번 단계와 같이 패킷을 전송하는 과정에서 랜덤 백 오프 시간을 대기하며 그 시간 동안 주변 다른 노드의 패킷 전송을 감지하지 못할 경우에 CMOP을 전송한다. 이러한 대기 시간을 설정한 이유는 노드들이 동시에 패킷을 전송하면서 발생할 수 있는 패킷 충돌 확률을 감소시키기 위해서이다. 만약 그 시간 동안 다른 노드의 패킷 전송을 감지하게 될 경우, 다음 슬롯에서 다시 랜덤 시간동안 백 오프하여 슬롯에 접근하는 과정을 반복한다.

CMOP은 네트워크로 플러딩 되기 때문에 여러 노드로부터 다중 수신이 가능하다. 본 알고리즘은 그 중 관계센터로부터의 홉 수가 가장 작고 RSSI(Received Signal Strength Indication)가 큰 노드 하나를 SMOP의 목적지로 설정하여, 해당 노드들에 의해서 각 노드가 전파하는 SMOP이 관계센터까지 릴레이 될 수 있도록 한다. 이렇게 설정한 이유는 CMOP 전송과 같이 SMOP 전송도 플러딩을 하게 되면 심각한 네트워크 오버헤드가 발생할 수 있기 때문이다. SMOP 정보는 슬롯 할당을 위해 관계센터에서 활용하는 정보이므로 SMOP 송신 노드에 의해 지목된 특정 노드만 수신한 SMOP을 릴레이 하게 함으로써 불필요한 네트워크 오버헤드를 감소시킬 수 있다.

Per-path 기반으로 SMOP을 관계센터로 전송하기 위해, 관계센터로부터의 홉 수가 가장 큰 노드부터 SMOP을 전송하도록 한다. 각 노드가 CMOP을 재 전파한 이후에 Tsec내에 자신보다 큰 홉의 노드로부터 CMOP을 수신 받지 못하면, 자신을 관계센터로부터 가장 멀리 있는 노드라고 판단한다. 그림 3은 SMOP이 전송되는 과정을 나타낸다. 예를 들어, 노드 h는 CMOP을 전파한 이후에 Tsec(본 논문에서는 T를 0.1 sec로 설정) 내에 자신보다 큰 홉의 노드로부터

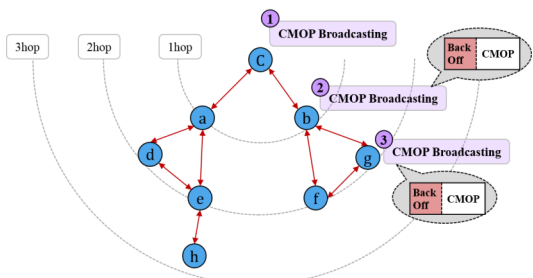


그림 3. CMOP 전파 과정  
Fig. 3. Process of CMOP Broadcasting

CMOP을 수신하지 못하므로 자신을 리프 노드라고 판단하고 SMOP 전송을 가장 먼저 시작한다. SMOP에는 자신의 ID, 관계센터로부터의 Hop Count, 슬롯 요청 수, 1-홉 이웃 노드의 ID가 포함된다. 1-홉 이웃 노드의 ID 정보는 관계센터가 네트워크의 연결성 맵을 관리하도록 하여 각 노드에게 슬롯 충돌이 발생하지 않는 범위 내에서 공간적 재사용성 (spatial reuse)을 고려한 슬롯을 할당하는데 사용된다. 자신보다 홉 수가 큰 노드로부터 SMOP을 수신한 노드는 해당 패킷을 관계센터로 포워딩하고 자신의 SMOP도 전송하여 최종적으로 관계센터로 모든 노드의 슬롯할당 요청 정보가 수집되도록 한다. 그림 4에서 노드 e가 노드 h로부터 수신한 SMOP을 포워딩하고 자신의 SMOP도 전송하는 2번 과정이 이에 해당한다.

SMOP은 슬롯 요청뿐만 아니라 자신의 이동성 여부를 알리기 위해서도 사용된다. 각 노드는 자신의 1-홉 이웃노드 정보가 변경되었을 때, 해당 정보를 SMOP에 담아 관계센터로 전송한다. 변경된 1-홉 이웃노드 정보를 수신한 관계센터는 네트워크 전체 노드에 대한 2-홉 연결성 맵을 갱신하고, 이에 따라 슬롯 스케줄링을 다시 수행한다. 즉, 노드 이동성으로 2-홉 연결성 맵 정보가 변경될 경우, 해당 정보는 하나의 프레임 이내에 관계센터로 즉시 전송되고, 관계센터는 다음 프레임에서 변경된 2-홉 연결성 맵에 대한 새로운 슬롯 할당 정보를 전파함으로써 이동성에 의한 슬롯 충돌 현상을 해결할 수 있다.

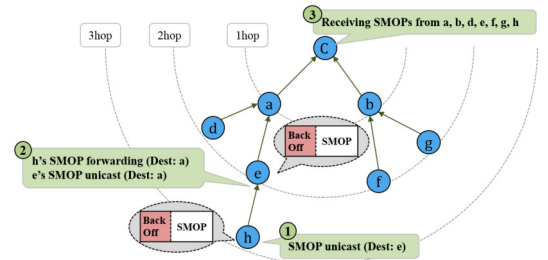


그림 4. SMOP 전파 과정  
Fig. 4. Process of SMOP Broadcasting

3.2.2 중앙집중식 2-홉 연결성 맵 구성 및 슬롯할당  
관계센터는 네트워크 구성 단계에서 초기 SMOP을 수집하기 위한 충분한 waiting time을 설정하고 해당 시간동안 수신한 SMOP을 기반으로 슬롯할당 과정을 수행한다. 슬롯 할당 과정을 수행하기 위한 첫 번째 단계로, 관계센터는 수신한 SMOP에 포함된 1-홉 이웃노드 정보를 활용하여 2-홉 연결성 맵을 구성한다.

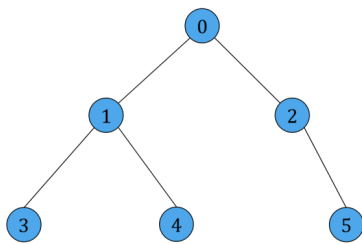


그림 5a. 토폴로지 예  
Fig. 5a. Topology example

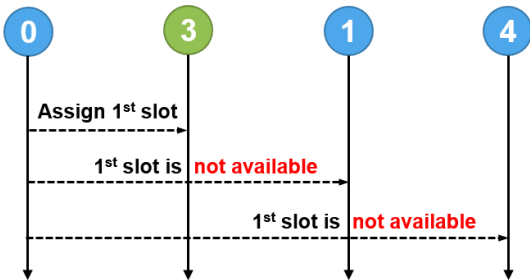
Node ID	Neighbor ID					
	ID	0	1	2	3	4
0	-	1	1	2	2	2
1	1	-	2	1	1	★
2	1	2	-	★	★	1
3	2	1	★	-	2	★
4	2	1	★	2	-	★
5	2	★	1	★	★	-

그림 5b. 2-홉 연결성 맵  
Fig. 5b. 2-hop connectivity map

Node ID	Slot Index			
	ID	1	2	3
0	0	0	0	...
1	0	0	1	...
2	0	1	0	...
3	1	0	0	...
4	0	1	0	...
5	1	0		...

그림 5c. 슬롯 할당 맵  
Fig. 5c. Slot assignment map

An example of slot assignment process: Node 0 → Node 3



An example of slot assignment process: Node 0 → Node 4

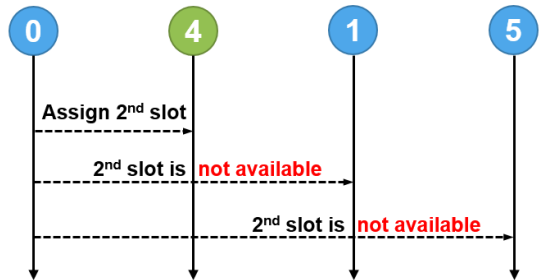


그림 5d. 슬롯 할당 과정의 예  
Fig. 5d. Example of slot assignment process

예를 들어 토폴로지가 그림 5a와 같을 때, 관제센터 (노드 0)가 구성한 2-홉 연결성 맵은 그림 5b와 같다. 관제센터가 노드 3의 SMOP을 수신하게 되면 노드 3의 1-홉 이웃노드 정보를 알 수 있다. 노드 3의 1-홉은 노드 1로써 그림 5b의 행렬 (4, 2)에 해당 홉 수를 저장한다. 이러한 과정을 반복하여 모든 노드들의 1-홉 이웃노드 관계정보를 입력하고 이를 기반으로 2-홉 이웃노드 관계까지 계산할 수 있다. 그림 5b의 별표는 두 노드의 관계가 2-홉 거리를 초과한다는 의미로, 이 경우 두 노드는 동일한 슬롯을 재사용할 수 있다. 예를 들어 그림 5b에서 노드 2와 노드 3은 2-홉 거리 밖에 존재하기 때문에 동일한 슬롯을 할당 할 수 있다.

2-홉 연결성 맵을 기반으로 구성된 실제 슬롯 할당 맵은 그림 5c와 같다. 그림 5c는 UT 구간을 위한 슬롯 할당 맵으로, 관제센터로부터의 홉 수가 가장 큰 노드들 중 노드 3부터 슬롯 할당을 시작한 예를 보인다. 그림 5d는 관제센터가 노드 3, 4에게 슬롯 할당을 해주며 발생하는 과정을 나타낸다. 그림 5d에서 관제센터는 노드 3에게 첫 번째 슬롯을 할당해주면서 슬롯 충돌 문제를 방지하고자 2-홉 거리 내에 있는 이웃

노드에 대해서는 노드 3과 동일한 슬롯을 할당하지 않는다. 이에 2-홉 연결성 맵을 참조하여 노드 0, 1, 4에게는 해당 슬롯을 할당해주지 않으며, 그림 5c와 같이 노드 3에게는 첫 번째 슬롯을 할당해주면서 1로 표시하고, 노드 0, 1, 4에게는 0이라고 표시한다. 노드 3의 슬롯 할당이 완료 되면 노드 4의 업링크 슬롯 할당을 수행한다. 노드 4의 경우, 자신의 2-홉 이웃노드에 의해 첫 번째 슬롯이 이미 할당 됐으므로, 슬롯 충돌을 회피하기 위해 두 번째 슬롯을 할당받는다. 따라서 노드 4는 두 번째 슬롯을 1로 표시하며, 동일한 슬롯을 할당받으면 안 되는 이웃노드 0, 1, 5에게는 0을 표시하였다. 다음으로 노드 5의 경우 첫 번째 슬롯을 할당받은 슬롯 3과 2-홉 거리 밖에 존재하므로, 서로 간의 통신에 영향을 미치지 않아 동일한 슬롯을 재사용함으로써 채널 사용률이 증가하는 효과를 보여준다. 위와 동일한 과정으로 노드 3, 4, 5의 슬롯 할당이 완료되면 다음으로 관제센터로부터의 홉 수가 작은 노드 1, 2의 슬롯을 할당하는 과정을 반복한다.

### 3.2.3 데이터 전송

초기 SMOP 수집을 위한 waiting time이 지나면 관제센터는 슬롯 할당 정보를 CMOP에 담아 전송함으로써 슈퍼프레임을 시작한다. 각 노드들은 CMOP에서 자신에게 할당된 슬롯 정보를 확인하고 해당 시간을 스케줄링하여 자신의 점유 슬롯에서 데이터를 전송한다. DT 구간에서는 각 노드들이 관제센터로부터 수신한 CMOP에 제어메시지를 피기백 하여 전파할 수 있다. 이 때, 관제센터와 근접한 노드부터 순서대로 슬롯을 할당받아 한 프레임 내에서 최종 목적지까지 패킷 전송이 수행된다. UT 구간에서는 SMOP과 멀티미디어 정찰용 데이터를 전송하는데 DT 구간과는 반대로 관제센터로부터의 홉 수가 큰 노드부터 순서대로 슬롯을 할당한다. 그러므로 리프 노드부터 관제센터까지 멀티미디어 정찰용 데이터를 빠르게 전송할 수 있다.

그림 6은 관제센터에서 무인로봇들로 전송하는 제어메시지와 무인로봇들이 관제센터로 전송하는 멀티미디어 정찰 데이터의 전송 과정을 보여준다. 슈퍼 프레임의 첫 번째 슬롯은 관제센터 전용 슬롯으로서 관제센터가 슬롯 할당 정보를 CMOP에 담아서 전송한다. 이를 수신한 노드 b는 DT 구간의 첫 번째 슬롯을 할당받았음을 CMOP에서 확인하고 CMOP을 재전파한다. 만약 관제센터로부터 수신한 제어메시지가 있다면 남은 다운링크 슬롯 구간에서 해당 패킷을 목적지로 전송한다. 노드 g는 DT 구간의 두 번째 슬롯을 할당 받아서 해당 슬롯에서 CMOP을 전송한다. UT구간은 리프 노드부터 순서대로 슬롯 할당이 이루어지므로 노드 h는 CMOP에서 자신의 UT 구간 할당 슬롯을 확인하고 데이터를 전송한다. 이후에 노드 e는 할당받은 슬롯에서 하위 노드로부터 수신한 멀티미디어 패킷을 포워딩하거나 자신의 멀티미디어 데이터를 관제센터로 전송한다.

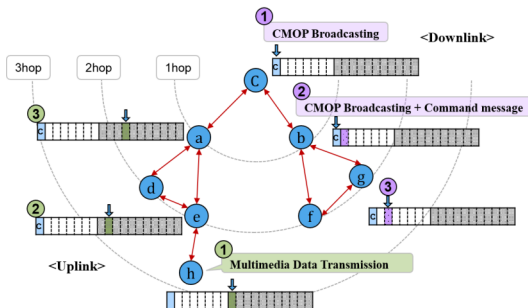


그림 6. UT와 DT 구간에서의 데이터 전송  
Fig. 6. Data Transmission during UT and DT period

## IV. 성능 평가

본 장에서는 ns-3 시뮬레이터를 활용하여 제안 기법과 비교 알고리즘의 성능을 평가한다. 비교 알고리즘은 Basic TreeMAC으로 TreeMAC 알고리즘의 기본적인 기능을 구현한 것이다. 해당 알고리즘은 TDMA 기반으로 동작하며 각 노드가 수요 슬롯 개수를 요청하고 할당받는다. 두 기법의 가장 큰 차이점은 데이터 트래픽의 목적지 방향 고려 유무이다. 제안 기법은 양방향 트래픽 전송을 고려한 슬롯 할당 기법을 제안한 반면 Basic TreeMAC 기법은 모든 노드들이 하나의 싱크 노드로 향하는 단방향 트래픽만을 고려하고 있다. 시뮬레이션 환경은 표 3과 같으며, 1개의 관제센터로부터 최대 3-홉 거리가 나타날 수 있도록 토폴로지는 그림 7과 같이 배치하였다. 그림 7에서 CC는 관제센터(루트 노드)를 의미한다. 성능은 업링크 트래픽인 경우와 다운 링크 트래픽인 경우로 나누어 평가하였고 모든 시나리오에서 ACK 메시지는 사용하지 않았다. 업 링크 트래픽 전송 시나리오의 경우, 루트 노드를 제외한 나머지 6개의 노드들이 루트 노드를 목적지로 하여 데이터 전송 주기를 1~5초씩 변

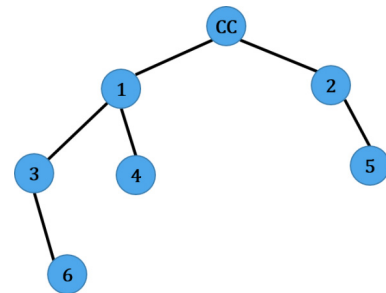


그림 7. 시뮬레이션 토폴로지  
Fig. 7. Simulation topology

표 3. 시뮬레이션 환경  
Table 3. Simulation environment

Parameter	Value
Number of Node	7 (1 root / 6 robota)
MAC	TDMA
PHY	IEEE 802.11b 2Mbps
Routing	DSDV
Slot Duration	3 ms
Superframe Duration	183 ms
Hop Count	1~3 hop
Application	100 bytes
Simulation Time	100 sec

화한다. 다운링크 트래픽 전송 시나리오의 경우, 그림 7에서 6번 노드를 제외한 모든 노드들(루트 노드 포함)이 6번 노드를 목적지로 하여 전송 주기를 1~5초씩 변화하며 데이터를 전송한다.

#### 4.1 업링크 트래픽 성능 평가

그림 8은 업링크 트래픽의 패킷 전송 성공률을 보인다. 제안 기법의 경우 패킷 전송 성공률이 비교 알고리즘보다 높게 나타난다. 이는 Basic TreeMAC의 경우, 모든 노드가 슬롯 요청을 하고 슬롯을 할당받기까지 소요되는 시간이 비교적 길기 때문이다. 슬롯을 할당받기 전까지는 경쟁기반으로 동작하기 때문에 채널 접근 기회를 부여받지 못하여 패킷 성공률이 저하된다. 반면에, 제안 기법의 경우에는 주기적인 슬롯 요청으로 인해 전체 노드가 슬롯 할당받는 시간이 상대적으로 짧다. 이로 인해 각 노드가 정해진 슬롯을 할당받아 경쟁 없이 전송을 하면서 패킷 전송 성공률이 증가하였다.

그림 9는 업링크 트래픽의 평균 지연 시간을 비교한 그래프이며, Basic TreeMAC 기법이 제안기법보다 짧은 지연시간을 보였다. 이는 Basic TreeMAC이 경쟁 기반으로 동작하는 시간이 제안 기법보다 길어서 나타나는 현상이다. 경쟁 기반으로 동작하게 되면

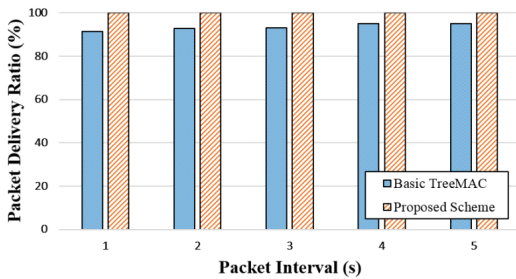


그림 8. 업링크 트래픽 패킷 전송 성공률  
Fig. 8. Packet delivery ratio of uplink traffic

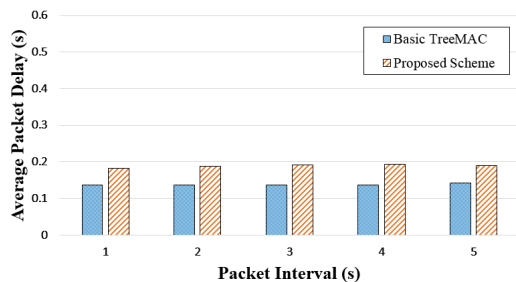


그림 9. 업링크 트래픽 평균 전송 지연 시간  
Fig. 9. Average packet delay of uplink traffic

할당된 슬롯까지 기다리지 않고 곧바로 채널에 접근하여 데이터를 전송한다. 그렇기 때문에 상대적으로 지연시간은 짧아지지만 패킷 성공률이 저하될 수 있다. 반면에, 제안 기법의 경우에는, 모든 노드가 슬롯을 할당받기까지 오랜 시간이 걸리지 않지만 데이터 전송을 위해 자신이 할당받은 슬롯 구간을 기다려야 한다는 점이 상대적으로 전송 지연 시간을 증가시켰다.

#### 4.2 다운링크 트래픽 성능 평가

그림 10은 다운링크 트래픽의 패킷 전송 성공률이 제안 기법이 비교 알고리즘보다 높은 패킷 성공률을 보였다. 이러한 현상이 나타나는 이유는 그림 8과 같이 Basic TreeMAC의 경쟁 기반 동작 시간이 상대적으로 길기 때문이다.

그림 11은 다운링크 트래픽의 평균 전송 지연 시간을 나타낸다. 그림 9의 업링크 트래픽 전송할 때와 달리 Basic TreeMAC 기법이 보다 긴 지연시간을 보였다. 이는 Basic TreeMAC의 슬롯 할당 방식에서 루트 노드와의 홉 수가 가장 큰 노드부터 차례대로 슬롯을 할당받기 때문이다. 따라서 업 링크 트래픽 전송 과정에서는 슬롯 할당 순서가 효과적으로 작용할 수 있지만, 다운링크 트래픽의 경우에는 오히려 지연 시간이 증가하게 된다. 반면에, 제안 기법의 경우에는 DT 구

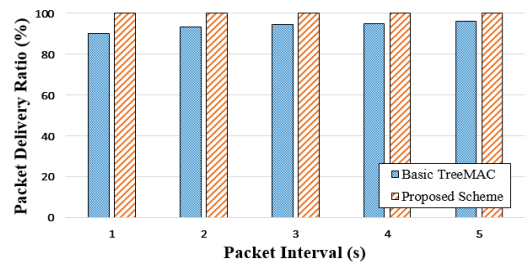


그림 10. 다운링크 트래픽 패킷 전송 성공률  
Fig. 10. Packet delivery ratio of downlink traffic

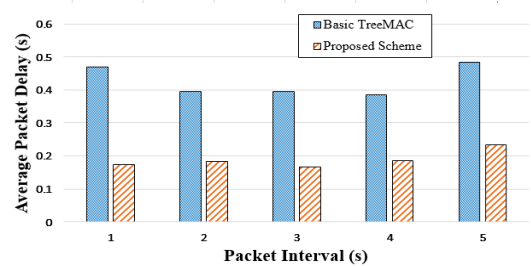


그림 11. 다운링크 트래픽 평균 전송 지연 시간  
Fig. 11. Average packet delay of downlink traffic



간을 돕으로써 다운로드 트래픽이 최종 목적지까지 한 슈퍼프레임 내에서 전송할 수 있도록 설계하여 짧은 전송 지연 시간을 보였다

## V. 결 론

본 논문에서는 무인로봇 체계에서의 데이터 특성을 고려한 중앙집중식 TDMA 알고리즘을 제안하였다. 양방향 트래픽을 고려하여 슬롯을 할당해줌으로써 단 방향만을 고려하는 기존 TDMA 기법들에 비해 멀티 미디어와 같은 QoS 보장을 요구하는 트래픽을 효과적으로 전송할 수 있었다. 제안 기법은 ns-3 시뮬레이터를 통해 성능 평가가 이루어졌으며 Basic TreeMAC 알고리즘과 비교 검증되었다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안한 기법이 비교 알고리즘에 비해 향상된 성능을 보임을 확인할 수 있었다. 업링크 트래픽 전송 시나리오에서는 비교 알고리즘에 비해 향상된 패킷 전송 성공률을 보였으며, 특히 다운로드 트래픽 전송 시나리오에서는 비교 알고리즘에 비해 현저히 감소된 지연시간을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

## References

[1] H. Baek, J. Lim, J. Koo, J. Jin, P. Chun, and I. Oh, "Reliable dynamic TDMA scheme with new packing method for image transmission over link-16," *J. KICS*, vol. 37, no. 11, pp. 1045-1053, Nov. 2012.

[2] W. S. Song, W. S. Jung, and Y. B. Ko, "Resource reservation based image data transmission scheme for surveillance sensor networks," *J. KICS*, vol. 39, no. 11, pp. 1104-1113, Nov. 2014.

[3] G. Choi, B. Kim, and B. H. Roh, "Classification of traffic classes for application services in military communication networks," *J. KICS*, vol. 37, no. 1, pp. 76-88, Jan. 2012.

[4] I. Bekmezci and F. Alagöz, "Energy efficient, delay sensitive, fault tolerant wireless sensor network for military monitoring," *Int. J. Distrib. Sensor Netw.*, vol. 5, no. 6, pp. 729-747, Nov. 2009.

[5] R. Ouni, "Dynamic slot assignment protocol for QoS support on TDMA-based mobile networks," *Computer Standards & Interfaces*,

vol. 34, no. 1, pp. 146-155, Jan. 2012.

[6] J. R. Cha, K. C. Go, J. H. Kim, and W. C. Park, "TDMA-based multi-hop resource reservation protocol for real-time applications in tactical mobile adhoc network," *MILCOM 2010*, pp. 1936-1941, San Jose, USA, Oct. 2010.

[7] W. Z. Song, R. Huang, B. Shirazi, and R. LaHusen, "TreeMAC: Localized TDMA MAC protocol for real-time high-data-rate sensor networks," *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 5, no. 6, pp. 750-765, Dec. 2009.

[8] G. S. Ahn, S. G. Hong, E. Miluzzo, A. T. Campbell, and F. Cuomo, "Funneling-MAC: a localized, sink-oriented MAC for boosting fidelity in sensor networks," in *Proc. Int. Conf. Embedded Netw. Sensor Syst.*, pp. 293-306, New York, USA, Oct. 2006.

[9] D. W. Gage, "A brief history of unmanned ground vehicle (UGV) development efforts," *Unmanned Systems Mag.*, vol. 13, no. 3, pp. 9-32, 1995.

[10] D. D. Vergados, D. J. Vergados, C. Douligeris, and S. L. Tombros, "QoS-aware TDMA for end-to-end traffic scheduling in ad hoc networks," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 13, no. 5, pp. 68-74, Oct. 2006.

## 한 지 나 (Jina Han)



2014년 2월 : 아주대학교 정보 컴퓨터공학과 학사  
 2016년 2월 : 아주대학교 컴퓨터공학과 석사  
 <관심분야> 스마트그리드, 무선네트워크

김 다 빈 (Dabin Kim)



2010년 2월 : 서울여자대학교 콘  
텐츠디자인학과 학사  
2010년 3월~현재 : 아주대학교  
컴퓨터공학과 석.박사통합과정  
<관심분야> Named Data  
Networking, MANET, 무선  
네트워크

권 대 훈 (DaeHoon Kwon)



1999년 8월 : 경북대학교 컴퓨터  
공학과 학사  
2002년 2월 : 경북대학교 컴퓨터  
공학과 석사  
2002년 1월~현재 : 국방과학연구  
소 선임연구원

<관심분야> 군 기술통신, MANET, 무선통신

고 영 배 (Young-Bae Ko)



1991년 2월 : 아주대학교 컴퓨  
터공학 학사  
1995년 2월 : 아주대학교 MBA  
경영정보학 석사  
2000년 7월 : Texas A&M Univ.  
컴퓨터공학 박사  
2000년~2002년 : 미국 IBM T.J

왓슨 연구소 전임연구원

2002년 9월~2011년 : 아주대학교 정보컴퓨터공학부  
조/부교수

2012년~현재 : 아주대학교 소프트웨어학과 정교수

<관심분야> Wireless Ad Hoc/Mesh Networks,  
IoT, Future Internet, Tactical Networks