https://doi.org/10.7840/kics.2022.47.1.1

미션 크리티컬 무인시스템을 위한 무선 SDN 라우팅 프로토콜

이 상 흥◆, 박 형 석*, 박 경 준°

A Routing Protocol for Wireless SDN in Mission-critical Unmanned Systems

Sangheung Lee◆, Hyung-Seok Park*, Kyung-Joon Park°

요 약

전장과 같은 미션 크리티컬 환경에서 네트워크의 패킷손실은 치명적인 결과를 초래할 수 있다. 이에 따라 미션 크리티컬 시스템의 경우보다 유연하고 강인한 네트워크 설계가 필요하다. 이를 위한 기술로는 소프트웨어 정의 네트워킹(Software Defined Networking, SDN)을 들 수 있다. 하지만, 지금까지 대부분의 무선 SDN 연구에서는 SDN 컨트롤러와 노드 간 단일 홉 통신을 가정하며 이는 노드 이동성을 제한하는 요소가 된다. 본 연구에서는 SDN 컨트롤러와 노드 간 멀티 홉 상황에서 링크 단절 시나리오를 고려한 라우팅 프로토콜을 제안한다. 시뮬레이션을 통해 제안하는 라우팅 기법이 패킷 전달률을 개선함을 확인하였다.

Key Words : Mobile Ad-hoc Networks, Software Defined Networking, Routing Protocol, Unmanned Systems, Self-Recovery

ABSTRACT

Under mission-critical scenarios such as a battlefield, network packet loss can result in a fatal consequence. Therefore, flexible and robust network design is crucial in mission-critical networks. Wireless software-defined networking (SDN) is a promising technology for this purpose. However, in most studies on wireless SDN, the communication between the SDN controller and mobile nodes is restricted to one hop, which significantly limits the mobility of the wireless nodes. In this paper, we propose a routing protocol that can effectively react to disconnection in multi-hop wireless SDN scenarios. By numerical simulation, we confirm that the proposed protocol can meaningfully increase the packet delivery ratio.

Ⅰ. 서 론

최근 여러 분야에서 군집 무인기의 활용이 큰 관심을 받고 있다. 특히, 전장과 같은 미션 크리티컬 상황에서 군집 무인기는 사람을 대신해서 정찰, 감시, 전투 등의 여러 임무를 수행할 수 있다.[1,2] 군집 무인 시스템에서 무인기들은 실시간 이동성을 지니고 있어서 동적 네트워크 토폴로지를 구성해야 한다. 따라서 군집 무인 시스템은 인프라가 필요 없는 Mobile Ad-hoc

※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 군집형 무인 CPS 특화연구실 사업의 일환으로 수행되었습니다.(UD190029ED)
◆ First Author : Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology, sheung.lee@dgist.ac.kr, 정회원
° Corresponding Author : Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology, kjp@dgist.ac.kr, 정회원
* Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology, hyungseok@dgist.ac.kr, 학생회원
논문번호 : 202110-275-B-RU, Received October 05, 2021; Revised November 01, 2021; Accepted November 04, 2021

Networks (MANET)를 활용하여 네트워크를 구성하는 것이 일반적이며, 이때 원활한 임무 수행을 위해 지상 통제스테이션(Ground Control Station, GCS) 및 각 무인기 간 신뢰성 있는 통신이 필수적이다.

기존 분산 MANET 프로토콜은 네트워크 관리가 분산되어 있으며 네트워크 토폴로지에 대해 전체 정보가 아닌 부분적인 정보만 각 노드에 제공된다.[3] 분산 라우팅 프로토콜은 군집 무인 시스템과 같은 동적 네트워크 환경에서 노드 간 연결과 QoS를 위한 최적의 결정을 내리는 것이 어렵다는 이슈가 있다. 반면에, 소프트웨어정의네트워킹(Software-Defined Networking, SDN)은 동적 네트워크의 유연한 관리를 제공한다. SDN은 네트워크를 컨트롤 평면과 데이터 평면으로 나누어 관리하며 SDN 컨트롤러에서 중앙집중형 소프트웨어를 통해 SDN 스위치들의 라우팅을 제어한다.[4] 군집 무인 시스템의 경우 통상 GCS를 통한 중앙제어를 수행하는 구조이기 때문에 네트워크 관점에서 GCS에 SDN 컨트롤러를 위치시킴으로써 SDN 도입이 가능하다.

그런데, 이러한 SDN의 장점을 MANET에 적용하는 연구 중 무선 SDN 멀티 홉 네트워크에 관한 연구는 아직 본격적으로 이루어지지 않고 있으며, 대부분의 경우 모델 및 개념제시 단계에 그치고 있다.[5] 또한, 미션 크리티컬한 상황에서 중요한 역할을 하는 릴레이 노드 고장으로 인한 네트워크 단절은 고려하지 않았다. 무선 SDN 관련 대부분 연구에서 컨트롤러 이외의 노드들은 SDN 컨트롤러의 전송 범위 내에 위치하는 것을 가정한다.[6-8] 이 경우 SDN 컨트롤러의 전송 범위로 노드들의 미션 수행 지역이 제한된다. Infrastructure-based 구조를 가정한 무선 SDN 연구[9-11]의 경우에는 군집 무인 시스템에서 통상 요구하는 Infrastructure-less 구조에 적합하지 않다.

본 논문에서는 그림 1과 같은 Infrastructure-less 구조의 무선 SDN 기반 멀티 홉 군집무인시스템에서 지상 통제스테이션과 노드 간 통신 단절이 발생했을 때 패킷 복구가 가능한 라우팅 프로토콜을 제안한다. 그림 1에서 노드의 이동성에 의해 특정 노드가 SDN 컨트롤러와 단일 홉 통신 범위를 벗어날 수 있다. 이 경우 특정 노드는 SDN 컨트롤러의 위치를 파악할 수 없기 때문에 자신의 정보를 SDN 컨트롤러에 전달하지 못하므로 브로드캐스팅 및 멀티 홉 통신을 통해 SDN 컨트롤러와 연결을 유지할 필요가 있다. 이 과정에서 생성된 경로를 통해 자신의 정보를 SDN 컨트롤러에 전달하고 플로우 테이블을 수신할 수 있다. 이러한 멀티 홉 네트워크 구조에서 지상 통제스테이션과

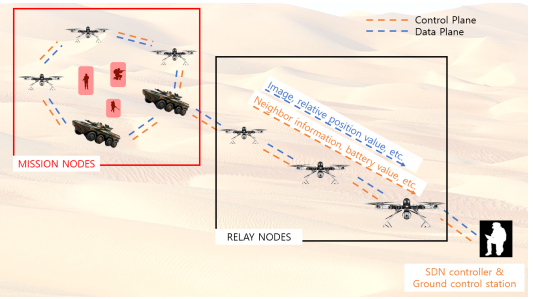

그림 1. 무선 SDN기반 군집 무인 시스템
Fig. 1. Concept of unmanned systems with wireless SDN

정찰 무인기들을 연결해주는 릴레이 무인기의 고장으로 인한 통신 경로 단절은 패킷손실을 유발할 수 있다. 특히, 전장과 같은 미션 크리티컬 환경에서 이러한 손실은 작전 실패 등과 같은 치명적 결과로 이어질 수 있다.

이를 해결하기 위해 본 연구에서는 무선 통신 단절을 빠르게 인지하고 이를 복구하는 프로토콜을 제안한다. 제안 프로토콜은 무선 SDN 환경에서 단일 홉 가정에 의한 노드 이동성 제한 문제 및 지상 통제스테이션과 노드 간 통신단절 문제를 해결하는 것을 목적으로 한다. 제안하는 프로토콜에서 단절을 인지한 노드를 게이트웨이 노드라 명명한다. 게이트웨이 노드는 노드들이 미션을 수행하면서 생성한 패킷을 캐싱하는 역할을 수행한다. 릴레이 노드 복구 후 게이트웨이 노드는 이 패킷들을 전달한다. Sim2net 시뮬레이션 검증 결과 링크 단절 시나리오에서도 제안하는 프로토콜의 적용을 통해 패킷 전달률을 높임으로써 미션 성공률 제고가 가능함을 확인하였다.

본 논문의 구조는 다음과 같다. 먼저 2장에서 무선 SDN 기반 라우팅 프로토콜을 상세히 설명한다. 3장에서는 시뮬레이션을 통해 제안 프로토콜의 성능 검증을 수행하고, 4장에서 결론을 맺는다.

Ⅱ. 무선 SDN 기반 시스템 구조

그림 2의 (a)는 제안하는 무선 SDN 멀티 홉 라우팅의 요소 기능들을 보여주는 시스템구조이다. SDN 컨트롤러는 주기적으로 브로드캐스팅 기능을 통해 주기적으로 노드들과 연결을 확인하여 노드 이동성에 따른 토폴로지 변화에 대응한다. 라우팅 기능은 각 노드로부터 노드 정보를 받아 각 노드의 플로우 테이블을 만든다. 무인 시스템 토폴로지 맵 기능은 노드들의 정보를 받아 사용자에게 노드들의 연결 상태 모니터링 서비스를 제공해준다. 리브로드캐스팅은 사용자가

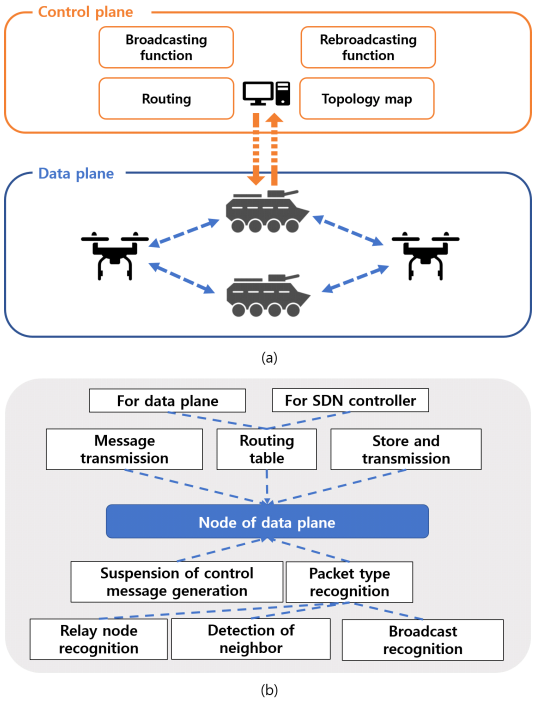

그림 2. 무선 SDN기반 시스템 아키텍처
Fig. 2. System architecture with wireless SDN

인위적으로 네트워크 상태를 관찰하여 SDN 컨트롤러에서 브로드캐스팅하여 노드들의 상태를 받아오는 기능을 제공한다. 이는, 고장 난 릴레이 노드를 대신할 새로운 노드 활용 시 브로드캐스팅 재활성화 역할을 한다.

그림 2의 (b)는 데이터 평면 노드의 시스템 구조이다. 각 노드는 패킷 종류에 따라 처리 방법이 다르므로 패킷 종류들을 구별하여 처리한다. 릴레이 노드가 고장 난 경우, 캐싱을 이용하여 패킷을 일시적으로 저장함으로써 패킷 전달률을 높인다. SDN 컨트롤러와 통신이 단절된 상황이므로 컨트롤 메시지 생성을 중단함으로써 패킷 전달률을 높이기 위한 캐싱 작업의 효율을 높인다.

표 1은 무선 SDN 라우팅 프로토콜에 이용되는 패킷 종류이다. Hello Message for Neighbor Information 패킷은 각 노드가 자신의 단일 홉 이웃노드를 저장하기 위해 이용한다. Hello Message from SDN Controller 패킷은 데이터 평면 노드들과 SDN 컨트롤러 사이 연결을 위해 이용된다. Information of Node 패킷은 이웃 및 자신의 정보가 담긴 패킷이다. Flow table 패킷은 SDN 컨트롤러가 노드들의 정보를 바탕으로 만든 각 노드의 플로우 테이블 정보이다. 이

표 1. 패킷 유형
Table 1. Packet Type

Packet Type	Source
Hello Message for Neighbor Information (Broadcast)	All node
Hello Message from SDN Controller (Broadcast)	SDN controller
Information of Node (Unicast)	All node
Flow table (Unicast)	SDN controller
Suspension (Broadcast)	Gateway node

정보는 SDN 컨트롤러부터 각 노드에 전송된다. Suspension 패킷은 게이트웨이 노드가 나머지 미션 노드들에 컨트롤 메시지 중단을 알리는 패킷이다.

Ⅲ. 제안 라우팅 프로토콜

3.1 브로드캐스팅

라우팅 프로토콜의 동작을 위해서는 다음 두 가지 타입의 브로드캐스팅이 필요하다.

첫 번째 브로드캐스팅은 이웃 노드를 찾기 위해 전송된다. 이 패킷을 받지 못하거나 전송하지 못한 경우에는 해당 링크가 불안정하다고 간주하여 그 주기의 링크를 제외한다. 모든 노드가 한 번씩 Hello Message for Neighbor Information을 브로드캐스팅하면 해당 메시지를 받는 단일 홉 거리의 노드들은 Hello Message for Neighbor Information에 대한 소스 노드의 존재를 알 수 있다. 그러므로 수신 노드는 송신 노드 정보를 저장할 수 있다. 그림 3은 실제 노드들이 Hello Message for Neighbor Information을 브로드캐스팅 할 때, 이웃 노드들이 저장되는 과정을 보여준다. 그림 3의 (a)는 노드 A가 브로드캐스팅 할 때, 주변 단일 홉 거리에 있는 B, C, D, E, F 노드가 이웃 노드 A 정보를 저장한다. 그림 3의 (b)는 A다음 G 노드가 브로드캐스팅 하게 되면 B, C 노드는 이웃 노드 G를 추가한다.

두 번째 브로드캐스팅은 각 노드로부터 목적지인 SDN 컨트롤러 경로를 찾기 위해 Hello Message from SDN Controller를 이용한다. 이 패킷은 SDN 컨트롤러가 생성하여 브로드캐스팅한다. 이 패킷을 받은 노드의 관점에서 송신 노드는 SDN 컨트롤러 라우팅의 다음 홉이 된다. 시퀀스 넘버를 이용하여 한 노드에서 브로드캐스팅의 중복을 억제한다. 시퀀스 넘버는

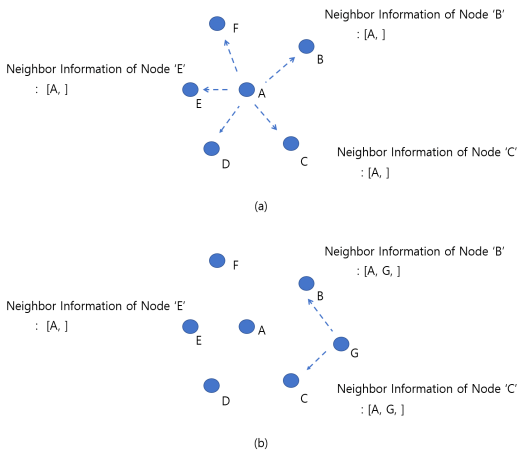

그림 3. 각 노드는 자신의 이웃 정보를 저장
Fig. 3. Nodes store their neighbor information

SDN 컨트롤러가 브로드캐스팅을 시작할 때마다 업데이트된다.

그림 4의 (a)는 SDN 컨트롤러로 라우팅 되는 경로가 생성되는 과정이다. SDN 컨트롤러로부터 B 노드가 패킷을 수신하면 B 노드 관점에서 SDN 컨트롤러로 향하는 다음 홉은 SDN 컨트롤러가 된다. B 노드는 다음 홉에 자기 정보를 전송하고 SDN 컨트롤러는 해당 데이터를 수신했다는 정보인 ack 메시지를 B노드에 보낸다. 그 후, B 노드는 다시 경로 형성을 위한 브로드캐스팅을 한다. 그림 4 (b)는 노드 C가 A의 브로드캐스팅 패킷을 받은 후 이웃 노드 정보를 다음 홉에 전송하는 예시이다. 노드 정보는 필요에 따라 확장될 수 있다.

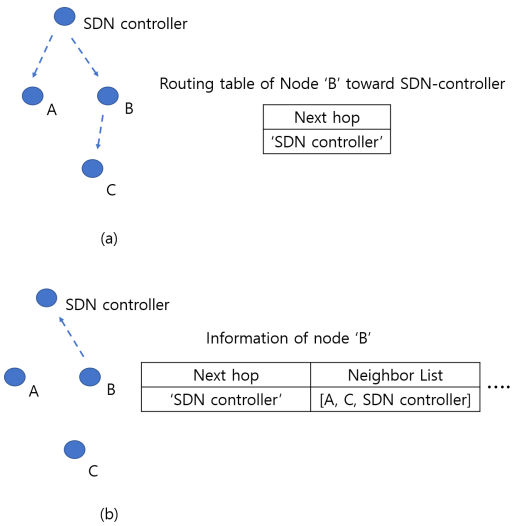

그림 4. SDN 컨트롤러와 나머지 노드들의 연결 유지를 위한 라우팅
Fig. 4. Maintaining connection between SDN controller and all nodes

노드의 정보를 전송할 때 SDN 컨트롤러가 모든 노드의 플로우 테이블 전송을 위한 경로를 생성하며, 이는 Route[destination][next_hop]으로 표현할 수 있다. 여기서 destination 값은 테이블 정보를 최종 수신하는 노드이다. next_hop 값은 SDN 컨트롤러가 destination으로 전송하기 위해 보내야 하는 다음 홉이다. 경로 생성을 위해 어떠한 노드에 특정 노드 정보 패킷이 도착하였을 때 그 패킷의 source 값이 destination이 되고 해당 패킷을 전송한 노드는 next_hop 값이 된다. 이러한 방법으로 모든 노드는 destination에 대한 next_hop 정보를 저장한다.

그림 5는 SDN 컨트롤러가 플로우 테이블을 전송할 때 쓰이는 경로가 생성되는 예시이다. 그림 5의 (a)는 C 노드가 SDN 컨트롤러에 전송하기 위해 B 노드를 거친다. B 노드는 destination 값과 next_hop 값을 저장한다. 그림 5의 (b)는 마지막 목적지인 SDN 컨트롤러에서 destination 값은 'C'가 되고 next_hop 값은 'B'가 된다.

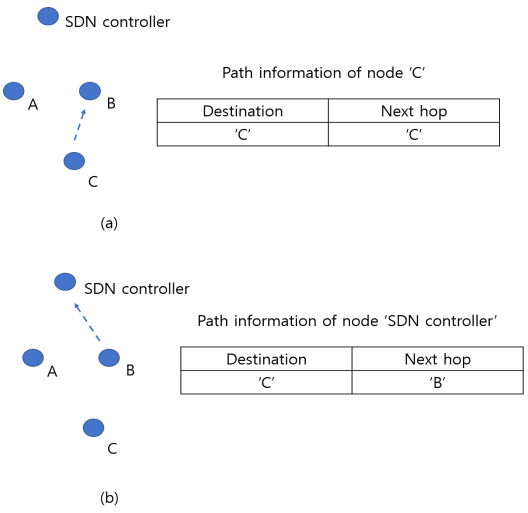

그림 5. 플로우 테이블을 위한 정보 생성
Fig. 5. Path generation for flow table

3.2 모든 노드에게 플로우 테이블 전송

각 노드로부터 해당 노드들의 정보를 받아 모든 노드의 플로우 테이블을 만든다. 단순 홉 정보를 이용하면 다익스트라 알고리즘[12]을 통해 최단 거리 테이블을 만들 수 있다. 홉 이외에 배터리 수명 등 다른 정보를 바탕으로 플로우 테이블을 만들 수도 있다. 만약

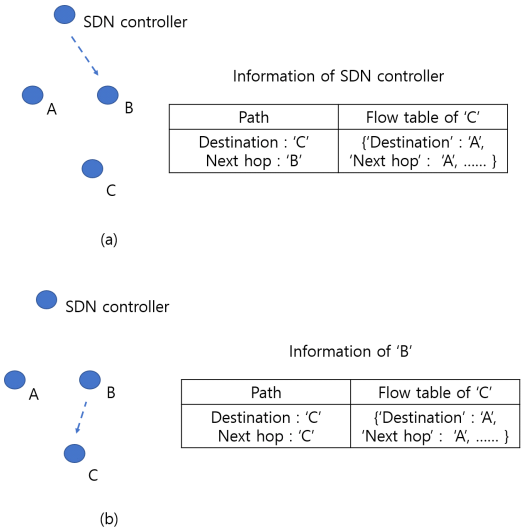

그림 6. 플로우 테이블 송신
Fig. 6. Transmission of flow table

플로우 테이블이 이전 정보와 중복이 된다면, 해당 노드에 보내지 않음으로써 라우팅 오버헤드를 줄인다. 플로우 테이블은 매우 중요한 정보이므로 확실한 전송을 위해 해당 패킷을 받는 노드는 이전 노드에 ack를 전송하도록 설정한다. 이전 과정에서 생성된 경로 테이블을 이용하여 플로우 테이블을 전달한다.

그림 6은 SDN 컨트롤러가 노드 'C'의 플로우 테이블을 전송하는 과정이다. 그림 6의 (a)는 이전에 생성된 경로를 바탕으로 B 노드에 전송한다. 그림 6의 (b)는 최종 목적지에 도착하는 그림이다.

3.3 단절 노드들의 패킷 전달률 제고 기법

릴레이 노드가 고장이 나는 경우 데이터 플레인의 노드들은 SDN 컨트롤러와 지상 통제스테이션과 단절이 된다. 이때 불필요한 컨트롤 메시지가 발생하게 되고 목적지에 도달할 수 없는 패킷은 버려지게 된다. 그러므로 릴레이 노드와 단절을 인지한 노드는 전송할 패킷을 캐싱하고 경로가 복구되면 패킷을 재전송

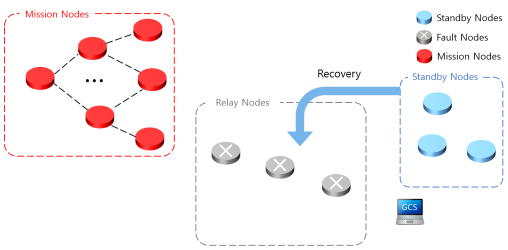

그림 7. 시뮬레이션 시나리오
Fig. 7. Simulation scenario

표 2. 시뮬레이션 파라미터
Table 2. Simulation parameters

Parameter	Value
Simulation tool	Sim2Net
Node	10, 30, 50, 80, 100
MAC protocol	CSMA
Relay node	3
Transmission range	50 m
Simulation area	1000×1000 m2
Recovery time	3 s
Velocity of mission node	2 m/s
Mobility model	Random way point

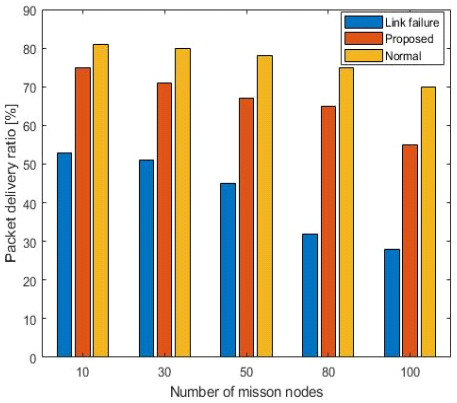

그림 8. GCS와 단절 되었을 때 패킷 전달률
Fig. 8. Packet delivery ratio when a node is disconnected from the ground control station

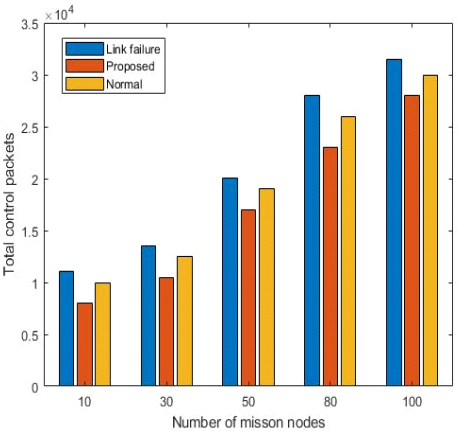

그림 9. GCS와 단절 되었을 때 총 컨트롤 패킷 수
Fig. 9. Total control packets when a node is disconnected from the ground control station

하여 패킷 전달률을 높일 수 있다. 마지막 릴레이 노드의 Hello Message from SDN Controller 패킷을 받는 미션 노드는 게이트웨이 노드가 되고 마지막 릴레이 노드의 정보를 저장한다. 이 정보를 이용해 단절의 유무를 알 수 있다. 만약 릴레이 노드가 고장이 나면 게이트웨이 노드는 마지막 릴레이 노드의 CTS를 받지 못하며 이를 통해 단절 상황을 인지할 수 있다. 단절을 인지한 게이트웨이 노드는 미션 노드 클러스터의 헤드 노드가 되어 나머지 미션 노드들에 컨트롤 메시지 생성 중단 패킷을 브로드캐스팅한다. 미션 노드들이 생성하는 일반 데이터는 게이트웨이 노드에서 캐싱한다. 대기 노드가 고장 노드 위치에 복구된다면 패킷은 손실되지 않고 단절된 상황에서도 지상 통제 스테이션에서 받을 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 멀티 홉 무선 SDN을 적용한 군집 무인 시스템에서 지상 통제스테이션과 노드 간 통신이 단절된 경우 이를 효과적으로 복구하는 기법에 관한 연구를 수행하였다. 제안한 기법을 통해 패킷 전달률을 제고할 수 있음을 확인하였다.

또한, 데이터 평면에서 GCS와 단절 시, 기존의 경우 패킷 재전송 횟수가 증가하여 전송 에너지 소모가 늘어난다. 하지만 제안하는 방법의 경우 단절 시간 동안 캐싱을 이용하기 때문에 추가적인 전송 에너지가 소모되지 않는다. 이러한 이유로 일반적인 방법과 비교 하였을 때, 제안 방법이 에너지 소모를 줄일 수 있다. 그러나 복구 관점에서 복잡도는 토폴로지에 따라 최악의 경우 미션 노드의 수만큼 중단 메시지를 브로드캐스팅하고 단절을 인지한 노드의 큐에 노드 수에 비례하여 패킷이 쌓인다. 그러므로 미션 노드의 수에 비례하여 복잡도가 증가한다. 또한, GCS와 단절 상황에서 릴레이 노드의 복구 시간 동안 생성되는 패킷이 한 노드에 모이는 병목 현상이 발생하여 해당 패킷 수와 복구 시간에 비례하여 패킷의 시간 지연을 유발한다.

그러므로 후속 연구로는 릴레이 노드의 복구시간에 따라 전송 패킷이 얼마나 지연되는지 상세히 분석하고 이를 적절히 해결할 수 있는 방안을 제안하여 통신 단절의 영향을 최소화할 수 있는 프로토콜 설계를 생각할 수 있다.

References

[1] Y. U. Lee, "A study on the effective military use of drones," *J. Inf. and Secur.*, vol. 20, no. 4, pp. 61-70, 2020.

[2] A. Girma, et al., "IoT-enabled autonomous system collaboration for disaster-area management," *IEEE/CAA J. Automatica Sinica*, vol. 7, no. 5, pp. 1249-1262, Sep. 2020.

[3] A. Zahmatkesh and T. Kunz, "Software defined multihop wireless networks: Promises and challenges," *J. Commun. and Netw.*, vol. 19, no. 6, pp. 546-554, 2017.

[4] S. Singh and R. K. Jha, "A survey on software defined networking: Architecture for next generation network," *J. Netw. and Syst. Manag.*, vol. 25, pp. 321-374, 2017.

[5] J. Wang, Y. Miao, P. Zhou, M. Shamim Hossain, and Sk Md Mizanur Rahman, "A software defined network routing in wireless multihop network," *J. Netw. and Comput. Appl.*, vol. 85, pp. 76-83, 2017.

[6] A. Zilberman, et al., "SDN wireless controller placement problem-The 4G LTE-U Case," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 16225-16238, 2021.

[7] M. Abdollahi, M. Abolhasan, N. Shariati, J. Lipman, A. Jamalipour, and W. Ni, "A routing protocol for SDN-based multi-hop D2D communications," in *2019 16th IEEE Annu. CCNC*, pp. 1-4, Las Vegas, NV, USA, 2019.

[8] K. Streit, C. Schmitt, and C. Giannelli, "SDN-Based regulated flow routing in MANETs," 2020 IEEE Int. Conf. *SMARTCOMP*, pp. 73-80, 2020.

[9] L. H. Binh and T.-V. T. Duong, "Load balancing routing under constraints of quality of transmission in mesh wireless network based on software defined networking," *J. Commun. and Netw.*, vol. 23, no. 1, pp. 12-22, Feb. 2021.

[10] S. Xu, et al., "Routing optimization for cloud services in SDN-based internet of things with TCAM capacity constraint," *J. Commun. and Netw.*, vol. 22, no. 2, pp. 145-158, 2020.

[11] N. Kiran, et al., “Joint resource allocation and computation offloading in mobile edge computing for SDN based wireless networks,” *J. Commun. and Netw.*, vol. 22, no. 1, pp. 1-11, 2019.

[12] E. W. Dijkstra, “A note on two problems in connexion with graphs,” *Numerische Mathematik*, vol. 1, no. 1, pp. 269-271, 1959.

이 상 흥 (Sangheung Lee)

2019년 8월 : 영남대학교 기계공학부 졸업

2021년 3월~현재 : 대구경북과학기술원 정보통신융합전공 석사과정

<관심분야> Resilient Cyber-Physical Systems

[ORCID:0000-0002-5938-9052]

박 형 석 (Hyung-Seok Park)

2018년 2월 : 국립한밭대학교 컴퓨터공학과 졸업

2020년 2월 : 대구경북과학기술원 정보통신융합전공 석사

2020년 9월~현재 : 대구경북과학기술원 정보통신융합전공 박사과정

<관심분야> Resilient Cyber-Physical Systems, Industrial Wireless Sensor-Actuator Networks, Reinforcement learning,

[ORCID: 0000-0002-4127-0790]

박 경 준 (Kyung-Joon Park)

1998년 : 서울대학교 전기공학부 학사

2000년 : 서울대학교 전기공학부 석사

2005년 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사

2005년~2006년 : 삼성전자 책임연구원

2006년~2010년 : 미국 UIUC 박사 후 연구원

2011년~2014년 : 대구경북과학기술원 정보통신융합전공 조교수

2014년~2019년 : 대구경북과학기술원 정보통신융합전공 부교수

2019년~현재 : 대구경북과학기술원 정보통신융합전공 교수

<관심분야> Resilient Cyber-Physical Systems, Industrial Communications, Smart Manufacturing

[ORCID: 0000-0003-4807-6461]