

전술 환경에서 상황 적응형 QoS 보장을 위한 TDMA 스케줄링 기법

위 광진*, 남성찬*, 고영배°, 박경준°°

Situation-Aware TDMA Scheduling Algorithm for QoS Guarantee in Tactical Environments

Gwangjin Wi*, Sungchan Nam*, Young-Bae Ko°, Kyung-Joon Park°°

요 약

전장에서는 성공적인 임무 수행을 위해 전투 체계 간 실시간 정보 공유 및 즉각적인 대응이 중요하다. 이에 따라 전술 센서 네트워크에서는 전술 데이터의 실시간 전송을 보장해주기 위해 엄격한 Quality of Service (QoS) 요구사항이 존재한다. 지금까지 QoS 보장을 위한 네트워크 자원관리 기술들이 많이 연구되었다. 하지만 불확실성이 큰 전술 네트워크의 특징 때문에 기존 기술을 그대로 적용하는 것은 어려움이 있다. 본 논문에서는 링크 단절 시 라우팅 경로가 실시간으로 변하는 시나리오를 고려한 Time Division Multiple Access (TDMA) 스케줄링 기법을 제안한다. OPNET 네트워크 시뮬레이션을 통해 제안하는 기법이 에너지를 효율적으로 사용하면서 전술 데이터의 QoS 요구사항을 보장하는 것을 확인하였다.

Key Words : tactical networks, time division multiple access, quality of service, period control, energy efficiency

ABSTRACT

In the battlefield, it is important to share real-time information and respond immediately between the combat systems for completing a successful mission. Therefore, strict quality of service (QoS) requirements exist to ensure real-time transmission of tactical data in tactical sensor networks. Substantial studies on network resource management for QoS guarantees have been studied so far. However, it is difficult to apply the existing studies to tactical environments due to the uncertainty in tactical networks. In this paper, we propose a Time Division Multiple Access (TDMA) scheduling algorithm considering scenarios in which routing paths change in real-time due to link failure. By simulation using OPNET, we confirm that the proposed algorithm can guarantee the QoS requirements of tactical data while increasing energy efficiency.

※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다 (UD190033ED).

• First Author : Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology, wgj2050@dgist.ac.kr, 학생회원

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

°° Corresponding Author : Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology, kjp@dgist.ac.kr, 종신회원

* Ajou University Department of Computer Engineering, skdiakffn@ajou.ac.kr, 학생회원

논문번호 : 202208-166-B-RU, Received August 1, 2022; Revised August 10, 2022; Accepted August 10, 2022

1. 서론

미래 전술 네트워크는 무인로봇, 무인기와 같은 무인네트워크체계를 활용하는 방향으로 발전하고 있고 이와 관련한 기술들이 활발하게 연구되고 있다.^[1,2] 특히, 전장에서의 성공적인 임무 수행을 위해서는 전투 체계 간 실시간 정보 공유, 동시 상황인식, 즉각적인 대응 등이 필수적이다. 그러므로 전장에서 발생하는 전술 데이터는 저지연 및 신뢰성 보장과 같은 엄격한 QoS 요구사항을 가진다. Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA)와 같은 경쟁 기반의 다중접속 기술은 충돌이 발생할 가능성이 있기 때문에 전술 데이터의 QoS 보장을 위해서는 Time Division Multiple Access (TDMA)와 같은 비경쟁 기반의 다중접속 기술이 적합하고 이와 관련된 효율적인 자원관리 기술 연구가 많이 진행되고 있다.

TDMA 기반 자원관리 기술은 스케줄링을 하는 주체에 따라 중앙집중형 방식과 분산형 방식으로 나뉜다. 중앙집중형 방식은 중앙 노드에서 네트워크 상황에 맞춰 센서 노드들을 스케줄링을 하는 방식이다. 분산형 방식은 센서 노드들이 스스로 스케줄링하거나 주변 노드와 로컬 메시지 교환을 통해 스케줄링 하는 방식이다. 중앙집중형 방식은 센서 노드의 정보를 얻어오는데 오버헤드가 발생한다는 단점이 있지만 정확한 최적 스케줄링이 가능하다는 장점이 있다. 반면 분산형 스케줄링은 각자 동작하거나 주변 노드와의 정보 공유만을 필요로 하기 때문에 오버헤드가 적다는 장점이 있지만 네트워크 상황변화에 취약하고 동기화가 필요하다는 단점이 있다. 두 가지 스케줄링 방식 모두 프레임 내 타임 슬롯을 노드들에게 효율적으로 분배하고 할당하는 것이 목적이다.

기존에는 중앙집중형, 분산형 방식의 스케줄링을 필요에 따라 결정하고 센서의 에너지 효율성, 처리량, 지연시간 등의 성능을 높이는데 초점을 맞춰 많은 연구가 진행되었다.^[3-7] 그러나 기존 연구들은 전술 네트워크에 그대로 적용하기에는 어려움이 있다. 왜냐하면 전술 네트워크는 인프라가 부족하며 매우 불확실성이 큰 네트워크 환경에 놓여있기 때문에 예기치 못한 상황이 발생할 수 있기 때문이다. 예를 들어, 전술 노드 간 링크 품질이 저하되어 링크 단절이 발생되거나 적군의 물리적인 공격으로 인한 전술 노드 파괴, 사이버 공격으로 인한 전술 데이터의 전송을 방해하는 악의 노드가 발생할 수 있다. 이러한 상황이 발생하면 전술 노드는 라우팅 경로를 변경하여 대체 경로를 통해 데이터를 전송해야 한다. 하지만 변경된 토폴로지에서

고정된 슬롯 스케줄링 정보를 그대로 사용하면 전술 데이터를 적시에 목적지까지 전달할 수 없는 문제가 발생한다. 따라서 토폴로지에 적용할 수 있는 동적 스케줄링 기술이 필요하다.

본 논문에서는 전장에서 예기치 못한 상황으로 인해 라우팅 경로가 실시간으로 변경됐을 때, 에너지 소모를 최소화하면서 전술 데이터의 지연시간 요구사항을 보장할 수 있는 TDMA 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 그림 1은 TDMA 기반 멀티 홉 전술 센서 네트워크에서 전술 노드들을 통제 및 제어하는 게이트웨이와 전술 데이터를 생성하는 전술 노드로 구성된 전술 네트워크 구조를 보여준다. 그림 1에서 열악한 전장 환경, 외부의 공격 등으로 인해 링크 단절이 발생 가능하다. 링크 단절을 파악한 전술 노드는 단절된 링크 경로를 피해 새로운 경로를 설정하여 데이터를 전송한다. 이 경우 기존의 슬롯 스케줄링 정보를 통해서 데이터를 전송하게 되면 전술 데이터의 지연시간 요구사항을 보장해주지 못한다. 특히, 전술 네트워크와 같은 미션 크리티컬 환경에서 QoS를 보장하지 못한다면 임무 실패, 병사의 생존성 문제 등과 같은 치명적인 결과로 이어진다.

이를 해결하기 위해 본 연구에서는 전술 노드의 에너지 소비를 최소화하는 것과 게이트웨이-전술 노드 간 중단 간 지연시간을 데드라인 이내에 전송하는 것에 대한 최적화 문제를 정의한다. 각 전술 노드는 실시간으로 라우팅 경로가 변경되었을 때 에너지 소모를 최소화하고 QoS를 보장할 수 있는 최적의 슬롯 활성화 주기를 찾고 설정한다. OPNET 네트워크 시뮬레이터를 통해 검증한 결과 실시간으로 경로가 변경되는 시나리오에서도 제안하는 알고리즘은 에너지 소모를 최소화하면서 데드라인 이내의 전송을 보장한다.

본 논문의 구조는 다음과 같다. 먼저 2장에서 전술 센서 네트워크의 시스템 모델과 제안하는 TDMA 스

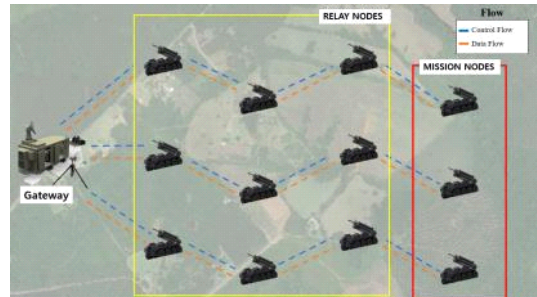


그림 1. TDMA 기반 멀티 홉 전술 센서 네트워크 구조
Fig. 1. Concept of TDMA based multi-hop tactical sensor network

케줄링 알고리즘을 상세히 설명한다. 3장에서는 OPNET 네트워크 시뮬레이션을 통해 제안 알고리즘의 성능 검증 실행하고, 4장에서 결론을 맺는다.

II. 본 론

2.1 시스템 모델

본 논문은 전송 데이터를 생성하는 전송 센서 노드 (N^S), 게이트웨이까지 데이터를 중간에서 전달하는 릴레이 노드(N^R)와 게이트웨이(N^{GW})로 구성된 TDMA 기반 멀티 홉 전송 센서 네트워크 시스템을 고려한다. 센서 노드에서 발생된 데이터가 게이트웨이까지 도달하는 과정인 플로우는 $F = \{(\tau, d, h, \vec{r}) | \tau \in T, d \in D, h \in H, \vec{r} \in \vec{R}\}$ 과 같이 정의한다. τ 는 플로우가 생성된 시간, d 는 플로우의 데드라인, h 는 플로우의 전체 홉 수, \vec{r} 은 센서 노드에서 게이트웨이까지 라우팅 경로 상의 모든 노드들의 집합을 의미한다. 센서 노드에서 발생하는 각 플로우(f_i)는 비주기적으로 생성되고, 포아송 분포(λ)를 따른다고 가정한다. 라우팅 경로는 $\vec{R} = \{(n^{gw}, n^r, n^s) | n^{gw} \in N^{GW}, n^r \subseteq N^R, n^s \in N^S\}$ 와 같이 정의한다.

그림 2는 본 연구에서 사용한 패킷 전송 메커니즘의 예시이다. 그림 2의 (a)는 예시에서 사용한 게이트웨이 1개, 노드 4개로 구성된 토폴로지이다. 그림 2의 (b)는 각 노드의 패킷 전송 주기이며, 노드 a는 전송 주기가 4이고, 노드 b는 전송 주기가 2, 노드 c는 전송 주기가 3, 노드 d는 전송 주기가 4임을 보여준다. 그림 2의 (c)는 각 노드의 활성화 주기에 따른 스케줄링

예시를 보여준다. 프레임 내 타임 슬롯의 배정이 c, d, a, b 순서이고, 그림 2의 (b)와 같이 각 노드의 주기가 설정되었을 때 각 노드들은 파란색 활성화 슬롯에서 패킷을 전송하고, 하늘색 비활성화 슬롯에서는 패킷을 전송하지 않는다. 예를 들면, 노드 c는 주기가 3이므로 첫 번째 프레임에서 패킷을 전송하고 두 번째, 세 번째 프레임은 비활성화 하여 패킷을 전송하지 않고 네 번째 프레임에서 그 다음 패킷을 전송한다.

2.2 제안 스케줄링 알고리즘

본 논문의 목적은 전송 센서 네트워크의 토폴로지가 동적으로 변하는 경우에 전체 네트워크의 에너지 소모량을 최소화하면서 센서 노드-게이트웨이 간의 중단 간 지연시간 요구사항을 보장할 수 있는 스케줄링 알고리즘을 개발하는 것이다. 전송 데이터의 지연 시간 요구사항을 보장하기 위해 전송 노드의 활성화 주기를 감소하게 되면 데이터를 송·수신 할 때 많은 에너지 소모가 발생한다. 이 두 가지 속성을 균형 있게 조절하여 최적화 하는 것이 매우 중요하다.

2.2.1 최적화 문제 정의

본 논문에서 고려하고 있는 전송 센서 네트워크의 구조는 각 센서 노드가 임무 수행을 하면서 수집한 센서 데이터를 릴레이 노드를 거쳐 게이트웨이까지 전달하는 것이다. 타임 슬롯의 길이는 네트워크에 존재하는 노드 개수와 같고, 모든 노드들이 바텀-업 방식으로 프레임 내 한 번씩 타임 슬롯에 할당돼 있는 것을 가정한다. 각 전송 노드의 패킷 발생률은 포아송 분포를 따른다. 각 노드로부터 들어오는 패킷의 양 (λ_v)은 각 노드를 지나는 모든 플로우의 패킷 발생률 (λ_f) 합으로 수식 (1)과 같이 정의된다.

$$\lambda_v = \sum_{f \in F_v} \lambda_f \tag{1}$$

전송 센서 네트워크에서 각 전송 노드의 에너지 소비율은 패킷 전송을 얼마나 자주 하는지에 따라 결정된다. 패킷을 한 번 전송할 때 소비되는 에너지양을 P_0 , 각 전송 노드의 활성화 주기를 I_v 라고 정의했을 때, 각 노드의 에너지 소비율은 수식 (2)와 같이 정의된다.

$$P_v = \frac{P_0}{I_v} \tag{2}$$

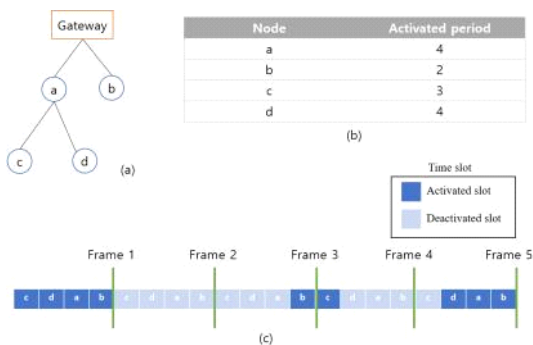


그림 2. (a) 4개 노드로 구성된 토폴로지 예시, (b) 각 노드의 활성화 주기, (c) 각 노드의 활성화 주기에 따른 스케줄링 예시
 Fig. 2. (a) Network topology, (b) Activated period of each node, (c) Example of scheduling based on activated period

표 1. 서비스 타입 별 성능 요구사항
Table 1. Granular service performance objectives

Granular service class	End-to-end latency (ms)	End-to-end packet loss (%)	End-to-end delay jitter (ms)
Short messaging	1000	0.5	-
Voice	220/250	1/1	20/20
Multimedia conferencing	220	1	20
Broadcast video	1000	0.1	-

표 1은 미 육군 UC 참조 아키텍처 문서에서 각 전술 데이터의 유형 별 성능의 요구사항을 기술한 것이다.^[8] 표 1과 같이 서비스 타입 별 보장시켜줘야 하는 종단 간 지연시간 요구사항이 존재한다. 종단 간 지연 시간은 전술 데이터를 발생시키는 센서 노드에서 패킷을 전송한 순간부터 릴레이 노드를 거쳐 최종적으로 게이트웨이에 도착하는데 걸린 시간을 의미한다. 전술 데이터의 지연시간 요구사항(Q_f)을 보장하기 위해서 본 논문에서는 프레임 내 노드의 활성화 주기를 조절한다. 노드의 활성화 주기에 따라 각 노드의 패킷 전송률이 변하게 되고 각 노드의 원 홉 딜레이가 결정되기 때문이다. 노드로부터 들어오는 패킷의 발생 분포가 포아송 분포를 따르고, 서비스 시간이 결정적이면 M/D/1 큐잉 모델로 시스템을 모델링할 수 있다. 큐잉 이론에 따르면 각 노드의 원 홉 딜레이는 수식 (3)과 같이 정의된다.^[9]

$$d_v = \frac{I_v}{2(1 - \lambda_v I_v)} \quad (3)$$

따라서 본 논문에서는 전술 데이터의 지연시간 요구사항을 보장하고 전체 네트워크의 에너지 소비율을 최소화 하는 것이기 때문에 수식 (4)와 같이 최적화 문제를 정의한다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \quad \sum_{v=1}^V \frac{P_0}{I_V} \\ & \text{subject to} \quad \sum_{k \in R_f} d_k \leq Q_f, \forall f \in F \end{aligned} \quad (4)$$

위 식은 임의의 플로우의 라우팅 경로 상에 존재하는 모든 노드들의 원 홉 딜레이의 합이 해당 플로우의 지연시간 요구사항보다 작다는 제약조건 하에서 전체

네트워크의 에너지 소비율을 최소화하는 것이다.

2.2.2 패킷 발생률 추정

전장에서는 그림 3과 같이 예기치 못한 상황으로 인한 링크 단절 상황이 빈번하게 발생한다. 이 경우 해당 링크를 지나는 플로우의 라우팅 경로가 바뀌게 되고, 노드에게 들어오는 패킷 도착율이 달라진다. 기존의 스케줄링으로는 전술 데이터의 지연시간 요구사항을 보장할 수 없기 때문에 동적으로 활성화 주기를 조절하여 원 홉 딜레이를 맞춰줘야 한다. 하지만 최적의 활성화 주기를 계산하려면 새로 들어오는 플로우의 패킷 발생률을 알아야 한다. 본 논문에서는 각 노드들에게 들어오는 패킷 도착율을 추정하기 위해 최대우도법 알고리즘을 사용한다.^[10]

최대우도법은 주어진 확률 분포의 파라미터를 추정하기 위해 사용되는 알고리즘이다. 경험을 통해 관찰한 n 개의 데이터를 기반으로 실제 확률 분포의 파라미터를 추정하는 방법이다. 본 논문에서 센서 노드가 발생하는 패킷은 포아송 분포를 따르고, 포아송 분포의 확률 밀도 함수는 수식 (5)와 같다. 포아송 분포의 우도 함수는 관찰을 통해 얻은 n 개의 샘플 데이터의 확률 밀도함수의 곱이며 수식 (6)과 같다. 포아송 분포의 파라미터 λ 는 수식 (6)에 자연로그를 취하고 미분을 하게 되면 수식 (7)과 같이 관찰한 n 개의 샘플 데이터를 통해 추정한다.

$$P(X=x) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!} \quad (5)$$

$$L(\lambda; x_1, \dots, x_n) = \prod_{j=1}^n \frac{\lambda^{x_j} e^{-\lambda}}{x_j!} \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (7)$$

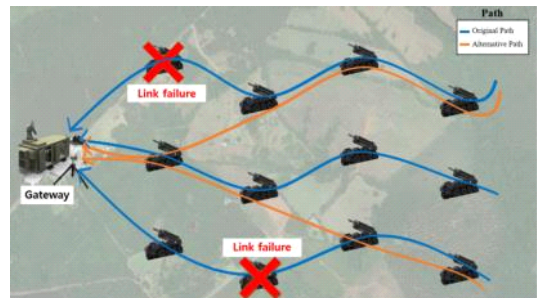


그림 3. 전술 센서 네트워크에서의 링크 단절 상황
Fig. 3. Link failure in tactical sensor network

2.2.3 분산 슬롯 활성화 주기 제어

본 논문의 목적은 전체 네트워크의 에너지 소비량을 최소화하면서 전송 데이터의 지연시간 요구사항을 만족하는 최적의 I_v 를 찾는 것이다. 수식 (4)의 목적함수를 최소화하기 위해서 지연시간 제약조건을 만족시킬 수 있는 최댓값 I_v 를 찾아야 한다. 본 논문에서는 트리 기반의 토폴로지를 고려했기 때문에 모든 플로우 f 의 홉 수 h_f 는 동일하다고 가정한다. 각 노드는 전송 데이터의 지연시간 요구사항(Q_f)을 fair하게 h_f 만큼 나눈 원 홉 딜레이를 유지한다면 중단 간 지연시간이 항상 데드라인보다 작다는 것을 보장한다. 따라서 수식 (4)의 제약조건은 수식 (8)과 같이 플로우의 라우팅 경로 상에 있는 노드의 원 홉 딜레이로 정의된다. 결국, 각 노드들은 스스로 수식 (9)를 만족하는 최댓값 I_v 를 찾아 전송 데이터의 지연시간 요구사항을 만족하면서 에너지 소비량을 최소화한다.

$$\frac{I_{k_1}}{2(1-\lambda_{k_1}I_{k_1})} + \dots + \frac{I_{k_n}}{2(1-\lambda_{k_n}I_{k_n})} \leq \frac{Q_f}{h_f} + \dots + \frac{Q_f}{h_f} \quad (8)$$

$$\frac{I_v}{2(1-\lambda_v I_v)} \leq \frac{Q_f}{h_f} \quad (9)$$

그림 4는 활성화 주기를 조절하는 프로세스를 수도 코드를 통해 나타낸 그림이다. 각 노드는 매 프레임마다 I_v 값을 업데이트한다. 슬라이딩 윈도우 방식을 사용하여 연속된 K 개의 샘플 데이터를 기반으로 λ_v 를 추정한다. 마지막으로 추정된 λ_v 값을 기반으로 최적화 식에 대입하여 노드 v 의 최적 활성화 주기 I_v 값을 계산하여 설정한다.

```

Algorithm 1 Pseudocode of activated period control
1: /* Update activated period  $I_v$  every frame */
2: for frame = 1 to Inf do
3:   /* Estimate  $\lambda_v$  based on maximum likelihood estimation (MLE) */
4:   /*  $\lambda_v$  is a average of  $K$  successive values using a sliding window */
5:   for j = 1 to K do
6:      $\lambda_j \leftarrow$  the number of packets arrived in (current.time - j) seconds
7:   end for
8:    $\lambda_v \leftarrow \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \lambda_j$ 
9:   /* Calculate optimal activated period */
10:   $I_v \leftarrow \lfloor \frac{2Q_f}{h_f + 2Q_f \lambda_v} \rfloor$ 
11: end for
    
```

그림 4. 슬롯 활성화 주기 제어 알고리즘
Fig. 4. The proposed slot activated period algorithm

III. 성능 분석

본 논문에서는 OPNET 네트워크 시뮬레이터를 통해 그림 5와 같은 시나리오에서 성능 분석을 수행하였다. 표 2는 시뮬레이션 파라미터들이다. 네트워크 토폴로지는 게이트웨이 노드 1개, 릴레이 노드 9개 그리고 센서 노드 3개 총 13개 노드로 구성된 트리 기반 멀티 홉 무선 센서 네트워크 구조이다. 프레임 길이는 30 ms이고, 프레임 내 슬롯 길이는 2 ms이다. 센서 노드에서 발생하는 트래픽 발생률을 0.5, 1, 2로 변화시키며 시뮬레이션을 수행하였다. 전송 트래픽의 지연시간 요구사항은 표 1을 고려하여 1000 ms로 설정하였다. 센서 노드에서 발생한 전송 데이터는 항상 게이트웨이 노드로 전송하고, 한 번의 패킷 전송을 할 때 사용되는 에너지량은 모든 노드가 동일하다고 가정한다. 적군의 악의적인 공격으로 인해 시뮬레이션 시간 40 s에 빨간색 엑스포시로 된 부분의 링크가 단절된 상황을 고려하여 시뮬레이션을 수행했다. 파란색 경로는 링크가 단절된 상황 이전의 라우팅 경로이고 빨간

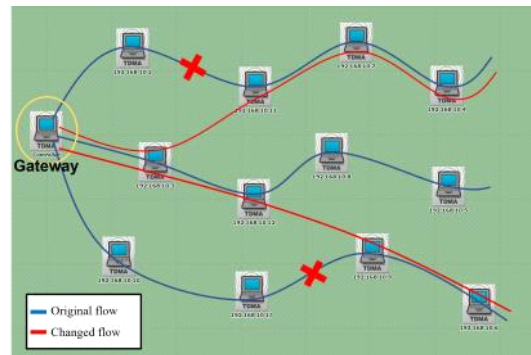


그림 5. 성능 분석을 위한 시뮬레이션 시나리오
Fig. 5. Simulation scenario for performance evaluation

표 2. 시뮬레이션 파라미터
Table 2. Simulation parameters

Parameter	Value
Simulation tool	OPNET 18.8
Simulation time	100 s
MAC protocol	TDMA
Number of nodes	13
Topology	tree-based multi-hop
Frame length	30 ms
Data slot length	2 ms
Traffic generation rate (λ)	0.5, 1, 2 (pkts/s)
Delay requirements (Q_f)	1000 ms

색 경로는 링크가 단절되어 바뀐 경로이다. 성능 비교는 주기를 각각 1, 8로 고정시킨 정적인 TDMA 스케줄링 방법과 비교하였다. 제안 알고리즘과 비교 알고리즘의 성능 평가를 위해 게이트웨이 노드까지 도착하는데 걸리는 중단 간 지연시간과 에너지 소비량을 사용하였다.

그림 6은 시뮬레이션 시간 100 s 동안 게이트웨이에 도착한 패킷의 중단 간 지연시간을 보여주는 그래프이다. 파란색 선과 황금색 선은 각각 주기가 8과 1인 정적 TDMA 스케줄링 방법의 결과 그래프이고, 빨간색 선은 제안한 알고리즘의 결과 그래프이다. 초록색 선은 전송 데이터의 데드라인 1000 ms를 나타낸다. 제안 알고리즘의 결과에서 40 s와 50 s 사이에 중단 간 지연시간이 급격하게 늘어난다. 그 이유는 링크 단절이 발생한 후에 변화된 패킷 발생률 λ 값을 추정하기 위해서 샘플링 하는데 시간이 소요되기 때문이다. 표 3은 그림 6의 중단 간 지연시간을 각 알고리즘 별로 평균값을 낸 결과이다. 주기가 8인 정적 TDMA 스케줄링 방법은 도착한 패킷의 평균 중단 간 지연시간이 데드라인 보다 크기 때문에 전송 데이터의 QoS를

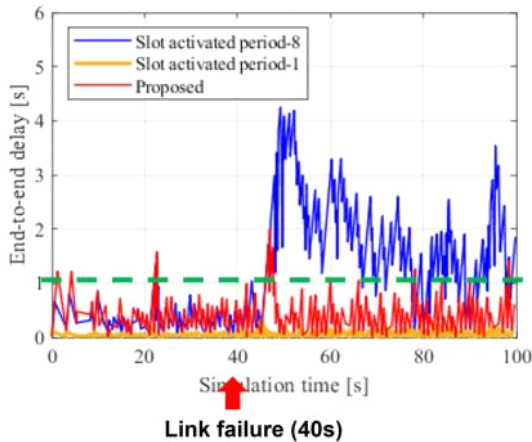


그림 6. 링크 단절이 발생했을 때 게이트웨이 노드의 중단 간 지연시간. 비교알고리즘 1: period-8, 비교알고리즘 2: period-1
Fig. 6. End-to-end delay of gateway when a link failure is occurred. comparison algorithm 1: period-8, comparison algorithm 2: period-1

표 3. 알고리즘 별 평균 중단 간 지연시간 비교
Table 3. The average of end-to-end delay for each algorithm

	Period-8	Period-1	Proposed
The average of end-to-end delay	1270 ms	76 ms	454 ms

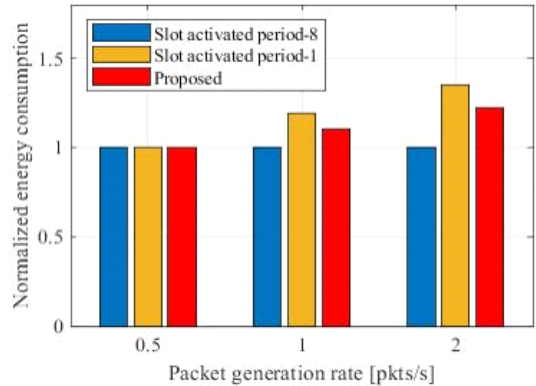


그림 7. 패킷 발생률에 따른 에너지 소비량. 비교알고리즘 1: period-8, 비교알고리즘 2: period-1
Fig. 7. Normalized energy consumption according to packet generation rate. comparison algorithm 1: period-8, comparison algorithm 2: period-1

보장하지 못한다. 반면, 제안 알고리즘과 주기가 1인 정적 TDMA 스케줄링 방법은 평균 중단 간 지연시간이 데드라인 보다 짧기 때문에 전송 데이터의 QoS를 보장한다.

그림 7은 센서 노드에서 발생하는 전송 데이터의 발생률을 변경시키며 에너지 소비량을 측정한 그래프이다. 파란색 막대와 황금색 막대는 각각 주기가 8과 주기가 1인인 정적 TDMA 스케줄링 방법의 결과이고, 빨간색 막대는 제안 알고리즘의 결과이다. 주기가 8인 정적 TDMA 스케줄링 방식의 에너지 소비량을 1로 정규화 했을 때 나머지 두개 알고리즘의 에너지 소비량과 비교하였다. 주기가 8인 정적 TDMA 스케줄링 방법은 에너지 소비량이 다른 두 알고리즘에 비해 적지만 전송 데이터의 QoS를 보장하지 못한다. 제안 알고리즘은 주기가 1인 정적 TDMA 스케줄링 방법보다 패킷 발생률이 각각 1, 2일 때 7.6%, 10.1% 에너지 소비를 줄이면서 전송 데이터의 지연시간 요구사항을 보장한다.

IV. 결론

본 연구에서는 전장에서 예기치 못한 상황으로 인해 링크 단절이 발생하는 경우 데드라인 이내에 전송 데이터를 전송할 수 없는 문제점을 찾고 이에 대한 해결방안을 제시하였다. 전송 데이터의 지연시간 요구사항을 보장하면서 에너지 소비량을 최소화하는 문제를 정의하고 최적의 슬롯 활성화 주기를 찾는 알고리즘에 관한 연구를 수행하였다. 그러나 대용량의 트래픽이 발생하는 상황에서 최적의 주기를 찾을 수 없는 경

우가 생기므로 이에 대한 해결방안에 대해서도 추후에 연구가 진행될 필요가 있다.

References

[1] H. J. Lee, et al., "A robot operating system framework for secure uav communications," *Sensors*, vol. 21, no. 4, 1369, Feb. 2021. (<https://doi.org/10.3390/s21041369>)

[2] S. ur Rahman, et al., "Positioning of UAVs for throughput maximization in software-defined disaster area UAV communication networks," *J. Commun. and Netw.*, vol. 20, no. 5, pp. 452-463, Oct. 2018. (<https://www.doi.org/10.1109/JCN.2018.000070>)

[3] J. S. Lee, et al., "Energy-Efficient TDMA scheduling for UVS tactical MANET," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 23, no. 11, pp. 2126-2129, Nov. 2019. (<https://doi.org/10.1109/LCOMM.2019.2936472>)

[4] S. C. Ergen and P. Varaiya, "TDMA scheduling algorithms for wireless sensor networks," *Wireless Netw.*, vol. 16, no. 4, pp. 985-997, May 2010. (<https://doi.org/10.1007/s11276-009-0183-0>)

[5] G. J. Wi, et al., "Delay-aware TDMA scheduling with deep reinforcement learning in tactical MANET," *Int. Conf. ICTC*, pp. 370-372, Jeju Island, Korea, Oct. 2020. (<https://doi.org/10.1109/ICTC49870.2020.9289080>)

[6] T. Gong, et al., "Reliable dynamic packet scheduling over lossy real-time wireless networks," *31st ECRTS 2019*, pp. 11:1-11:23, Stuttgart, Germany, Jul. 2020. (<https://doi.org/10.4230/LIPIcs.ECRTS.2019.11>)

[7] H. Park, et al., "Multi-agent reinforcement-learning-based time-slotted channel hopping medium access control scheduling scheme," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 139727-139736, Jul. 2020. (<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3010575>)

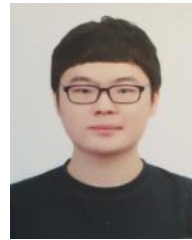
[8] Army, Unified US, *Capabilities (UC) Reference Architecture (RA)*, Version 1.0, 2013.

[9] I. Adan and J. Resing, *Queueing theory*, Eindhoven Univ. of Technology Eindhoven, 2002.

[10] Marco Taboga, *Lectures on Probability Theory and Mathematical Statistics*, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2017.

[11] Riverbed, *Network Simulation (Riverbed Modeler Suite)*, Retrieved Jul., 26, 2022, from <https://www.riverbed.com/products/npm/riverbed-modeler.html>

위 광 진 (Gwangjin Wi)



2019년 2월 : 국민대학교 컴퓨터공학과 졸업
 2019년 3월~현재 : 대구경북과학기술원 전기전자컴퓨터공학과 통합과정
 <관심분야> Cyber-Physical Systems, Industrial Communications, Smart Manufacturing

[ORCID:0000-0002-0152-002X]

남 성 찬 (Sungchan Nam)



2021년 2월 : 아주대학교 소프트웨어학과 졸업
 2021년 3월~현재 : 아주대학교 컴퓨터공학과 석사과정
 <관심분야> trust evaluation, tactical network, mobile ad-hoc network, IoT

[ORCID:0000-0002-8209-0518]

고 영 배 (Young-Bae Ko)



1991년 2월 : 아주대학교 컴퓨터공학 학사

1995년 2월 : 아주대학교 경영정보학(MIS) 석사

2000년 7월 : Texas A&M University(College Station) 컴퓨터공학 박사

2000년 8월~2002년 8월 : 미국 IBM T.J Watson 연구소 전임연구원

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

2012년~현재 : 아주대학교 정보통신대학 소프트웨어학과 정교수

<관심분야> trust evaluation, tactical network, mobile ad-hoc network, IoT

[ORCID:0000-0002-8799-1761]

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 박사후 연구원

2011년~현재 : 대구경북과학기술원 전기전자컴퓨터공학과 교수

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

[ORCID:0000-0003-4807-6461]