

Advanced flow control techniques using buffer-based routing and traffic filtering in tactical ad-hoc networks

Lim, Donghyun* • Oh, Kyosang** • Shin, Seunghoon*** • Kim, Jeonghun**** • Kim, Deukhwa*****

ABSTRACT

Ad hoc networks are increasingly used in military communications, unmanned systems, and autonomous driving, where maintaining stable data delivery without centralized control is a major challenge. Our study proposes an integrated flow-control mechanism that manages traffic based on the available capacities of transmit and receive buffers. On the transmitter side, a priority-based packet filter dynamically drops low-priority traffic under congestion while maintaining mission-critical flows. On the receiver side, an enhanced routing protocol, OLSRb (OLSR-buffer-aware), embeds receive-buffer availability in TC(Topology Control) messages to avoid congested nodes during route selection. The proposed architecture and operational procedures are evaluated through two validation stages: (1) transmitter-side testing under variable buffer thresholds and (2) receiver-side comparison between OLSRb and standard OLSR. Results show that OLSRb reduces packet loss by about 17% on average, confirming improved transmission stability and adaptability. The mechanism effectively enhances reliability and resource efficiency in dynamic tactical and autonomous ad hoc network environments.

Keywords: Tactical ad-hoc networks, buffer-aware integrated flow control, packet filtering, buffer-aware routing protocol

* (First author) funzin, Associate Researcher, bryan.dh.lim@funzin.co.kr, <https://orcid.org/0009-0004-9564-1763>.

** (Co-author) funzin, Managing Director, david.ks.oh@funzin.co.kr, <https://orcid.org/0009-0004-4929-9995>.

*** (Co-author) funzin, Corporate Research Institute, CTO, kyle.sh.shin@funzin.co.kr, <https://orcid.org/0009-0009-6391-9165>.

**** (Co-author) funzin, COO, marc@funzin.co.kr, <https://orcid.org/0009-0005-2433-996X>.

***** (Corresponding author) funzin, CEO, marc@funzin.co.kr, <https://orcid.org/0009-0006-5197-1247>.

I. 서론

Ad-hoc 네트워크는 고정된 인프라(기지국, 백본) 없이 현장의 노드(node)가 자율적으로 망을 형성하고 스스로 복구하여 즉시 통신 환경을 구축하는 분산적·자기조직화 네트워크이다(Nabben & Rennie, 2022; Remondo, 2011). 해당 네트워크에서 데이터는 특정 중앙 장치를 거치지 않고, 여러 노드를 경유하는 멀티 홉 분산 라우팅 방식을 통해 원거리까지 전송할 수 있다. 이런 네트워크는 아군의 기동, 부대 분절, 적의 재밍(전파 방해) 공격 등으로 통신망 일부가 마비되더라도 즉시 우회 경로를 탐색하여 높은 생존성과 통신 은밀성을 유지할 수 있는 특징을 갖고 있다. 그래서 이 네트워크는 신속한 전개와 유연한 망 운용이 요구되는 군사 분야에서 유용할 수 있다. 최근 군사적으로 유무인 통합체계를 통한 드론의 공격 및 정찰 임무 활용 필요성을 높아지면서 Ad-hoc 네트워크 기반의 다양한 기술이 빠르게 도입되고 있다.¹⁾ 현재 군사용 Ad-hoc 네트워크 기반의 기술개발을 목적으로 VANET(Vehicular Ad-hoc Network), MANET(Mobile Ad-hoc Network), FANET(Flying Ad-Hoc Networks), 전술 센서 네트워크 등에 관한 연구개발이 진행되고 있다(Cho & Ryou, 2024; Lim et al., 2025).

하지만 군사적 운용 환경은 노드(병사, 차량, 드론 등)의 끊임없는 이동이나 전투 중 파괴나 적 재밍 공격의 노출로 인해 네트워크 토폴로지가 실시간으로 급변할 수 있어 Ad-hoc 네트워크(VANET, MANET, FANET 등)에서 기술적 장애 요소가 존재한다. 이런 예측 불가능한 링크 단절, 데이터 전송 지연, 특정 노드 등의 문제로 트래픽이 몰리는 병목 현상(bottleneck)은 통신의 안정성을 크게 저해할 수 있다. 즉, 전술 Ad-hoc 네트워크는 노드 간의 자율·동적 연결 구조로 인해 네트워크 토폴로지가 빈번하게 변화하고, 분산 제어 운영에 따른 통신 불안정성(패킷 손실, 지연 증가, 링크 단절, 혼잡 등)의 문제가 발생할 수 있다. 예를 들어, 후방 지휘소에서 지휘관(remote leader)의 명령 데이터가 최전방 부대에 전송되는 상황을 가정하면, 해당 데이터가 중간 경유지 A 노드(다른 드론 또는 차량)로 전달되나 A 노드가 이미 주변 지상군의 상태 보고나 센서 데이터 중계로 포화 상태에서 수신 버퍼가 가득 차 명령 패킷이 큐(queue)에 진입하지 못하고 유실되거나 지연되어 신속한 군사 작전에서 안정적인 데이터 전송이 제한될 수 있다(Kanellopoulos, 2019). 게다가 병목 노드인 A는 과도한 송수신·재전송 과정에서 에너지의 소모가 급격히 증가하면서 방전으로 네트워크 이탈이 발생하여 연결성 붕괴로 전장 운용 시간이 크게 단축될 수 있다(Paranjothi, Khan, & Zeadally, 2020).

결국 군사 Ad-hoc 네트워크의 혼잡 문제는 통신 품질 저하뿐만 아니라 네트워크의 생존성 자체를 위협할 수 있어 작전의 성패를 좌우하는 요인이다. 그래서 이러한 치명적인 혼잡을 사전에 탐지하고

1) Anduril 社 Anduril ‘Lattice’ 플랫폼은 자사의 Ad-hoc 통신망 솔루션인 ‘Lattice Mesh’를 기반으로 AI 기반 자율 무인 전력의 지휘를 지원하였으며, Silvus 社의 지상 차량과 드론을 연결한 유무인 복합 체계를 지원하는 MANET 솔루션인 ‘meshONE’을 미 공군과 계약하였다.

효과적으로 제어하여 군사 작전의 신뢰성과 데이터의 적시성을 보장하는 흐름제어가 중요하다. 이 제어 기법은 네트워크 내 노드의 상태를 실시간으로 감지하고, 이 정보를 기반으로 데이터 전송률을 능동적으로 조절하거나 트래픽을 혼잡하지 않은 최적의 경로로 우회할 수 있다. 이는 네트워크 자원의 효율적 분배와 특정 노드의 과부하 방지가 가능하여 전체 네트워크의 안정성과 종단 간(end-to-end) 통신의 품질을 확보할 수 있다. 이에 본 연구는 군사 Ad-hoc 네트워크 기술 개발 시 신뢰성과 안정성을 제공할 수 있는 버퍼 가용성 기반의 흐름제어 기법을 제안한다. 이 기법은 노드에 송신 버퍼와 수신 버퍼의 가용량을 실시간으로 측정하고, 이를 기반으로 송신·수신 흐름제어를 수행한다. 송신 측에서 버퍼가 일정 수준 이상 차올라 혼잡이 감지되면, 트래픽 우선순위 기반의 필터링 정책을 적용한다. 이는 혼잡 상태에서 중요 트래픽의 우선 전송을 보장하면서 우선순위가 낮은 트래픽은 필터링하여 노드의 과부하를 방지하고 혼잡 상황에서도 핵심 데이터의 생존성을 보장한다. 이와 동시에 수신은 OLSR 라우팅 프로토콜을 확장한 OLSRb(OLSR-buffer-aware)²⁾를 도입하여 혼잡 회피 라우팅을 수행한다. 그래서 수신 버퍼의 상태 정보를 TC 메시지를 통해 인접 노드에 전파하고, 이를 라우팅 경로 선정에 반영함으로써 혼잡 노드를 경로에서 회피할 수 있다. 이는 수신 기반 흐름제어 방식으로써 네트워크 레벨에서의 혼잡 회피를 실현한다. 본 연구는 이런 제안한 기술의 구현 가능성과 효율성을 검증하기 위해 송신·수신 흐름제어 기법을 D2D 모의 단말을 구성하여 시뮬레이션을 수행한다. 이를 통해 해당 D2D 모의 단말이 제시한 알고리즘에 따른 흐름제어의 기능을 분석한다.

II. 관련 연구

Ad-hoc 네트워크 환경에 관한 선행연구는 통신의 안정성과 에너지 효율, 네트워크 수명을 확보하기 위한 다양한 흐름제어 기법을 제안하고 있다. 기존 Ad-hoc 네트워크에서 흐름제어 기술에 관한 연구의 주요 기법을 살펴보면 다음과 같다(Table 1).

첫째, QoS 기반의 라우팅과 흐름제어 측면에서 Badis & Al(2005) 연구에서 제시한 QOLSR(QoS-OLSR)는 기존 OLSR 라우팅 프로토콜에 QoS(Quality of Service) 지원을 확장한 대표적인 기법이다. 이 기법은 지연, 대역폭 등의 QoS 요구사항을 라우팅 결정에 반영하여 트래픽 유형에 따라 차등화된 경로를 선택한다. 이 기법은 QoS 라우팅이라는 단일 메커니즘을 통해 트래픽 관리로 본 연구에서 제안하는 버퍼 가용량 기반의 송수신 통합 흐름제어 기법과 접근 방식에서 차이가 있다. 둘째, 링크 품질 기반의 경로 선택 측면에서 De Couto et al.(2003)의 연구는 ETX(Expected Transmission Count)라는 링크 품질 기반 메트릭을 제안하였으며, 이는 OLSR-ETX와 같은 프로토콜에 적용되었

2) 본 연구는 OLSR-buffer-aware의 의미로 새롭게 제안하는 라우팅 기법의 명칭으로 제시함. 기존 OLSR은 단순히 ‘가장 적은 홉 수’, 즉 최단 경로로 데이터를 전송하나 OLSRb는 여기에 ‘버퍼 가용량’ 정보를 라우팅 결정에 추가로 활용함.

다. ETX는 링크의 양방향 패킷 손실률을 기반으로 해당 링크를 통해 패킷을 성공적으로 전달하기까지 필요한 예상 전송 횟수를 계산한다. 이 기법은 최소 홉(hop) 수 대신 링크 품질이 높은(즉, ETX 값이 낮음) 경로를 선택함으로써 네트워크의 신뢰성을 높이려고 한다. 이는 링크 품질의 단일 지표에 기반한 경로 최적화에 중점을 두고 있어 본 연구의 버퍼 상태 인지를 통한 동적 혼잡 제어 및 통합 흐름제어와 구분된다.

셋째, 계층 간 협업 기반의 흐름제어를 보면, Kumar et al.(2014)은 혼잡 인지 기반 크로스 레이어 라우팅 기법을 제안하며, 데이터 전송률, MAC 오버헤드, 버퍼 지연시간 등 다양한 지표를 종합하여 혼잡도를 평가하고 경로 선택에 반영하였다. 반면, 본 논문은 혼잡 인지 요소를 단순화하여 버퍼 가용량이라는 단일 지표로 대체함으로써 구현 및 연산 측면에서 경량화된 구조를 제공하고자 한다.

넷째, 노드 상태에서 혼잡 인지 기반 경로 선택의 경우 Lee, Cho & Campbell(2003)의 연구는 AODV/DSR 기반 라우팅 프로토콜에 노드의 부하 정보를 결합한 방식이다. 각 중간 노드는 자신의 큐에 대기 중인 패킷 수를 라우팅 요청(RREQ)에 포함하여 전파하며, 목적지는 누적 부하가 가장 적은 경로를 선택한다. 이는 본 논문에서 제안한 수신 흐름제어와 유사하게 노드 상태를 라우팅에 반영하는 방식이나, 큐의 대기 패킷 수를 기준으로 하므로 장비 간 스펙 차이에 따른 상대적 부하 판단이 어렵다는 한계가 있다. 반면, 본 논문은 절대 수치가 아닌 버퍼의 가용량을 기준으로 판단함으로써 이중 장비 환경에서도 적용 가능하다는 차별점이 있다. Kumar & Hu(2024) 연구는 UAV와 같은 공중 네트워크의 동적인 환경에서 QoS를 확보하기 위해 교차 계층(Cross-Layer) 프로토콜을 설계하였다. 이 연구는 MAC 및 라우팅 계층을 결합하여 모빌리티 및 혼잡을 동시에 인지하는 선제적 라우팅 기법을 제안하며, 다양한 지표를 활용하여 경로 안정성과 QoS를 개선한다.

끝으로 트래픽 유형과 우선순위 기반의 제어 측면에서 Ahn et al.(2002)은 QoS 차등화를 통해 분산 제어를 수행하는 시스템을 제안하였다. 실시간 트래픽에 대해서는 소스 노드에서 송신 제어를, Best-effort 트래픽에 대해서는 각 노드에서 전송률을 제어하도록 하여 트래픽 유형별 우선순위를 두었다. 이 기법은 트래픽 등급에 기반한 전송률 제어가 특징이나, 버퍼 상태를 기반으로 한 라우팅이나 패킷 드롭 기능은 포함하지 않는다. Li & Cuthbert(2005)는 다중 경로 라우팅과 DiffServ, 분산 트래픽 제어 기법을 통합 QoS 메커니즘을 제안하였다. 본 연구는 다양한 흐름제어 기법들을 조합하여 통합적인 QoS 제공을 시도한 사례로, 본 논문과 유사하게 이는 송수신 흐름제어를 함께 고려한 구조로 트래픽 등급 기반의 우선 처리에 중점을 둔 제어방식으로 본 연구는 버퍼 가용량 기반 접근을 통해 기술 구현을 시도한다. 최근 Lee & Kim(2025)는 (m, k) -firm 제약 조건을 활용하여 실시간 트래픽의 긴급도를 높이고 차등화된 QoS를 제공하는 패킷 스케줄링 기법을 제안하였다. 이 기법은 혼잡 상황에서 트래픽의 우선순위와 지연 임박 정도를 기준으로 패킷 처리를 결정함으로써 필수 트래픽의 보존을 목적으로 한다. 이는 Ahn et al.(2002)과 Li & Cuthbert(2005)의 트래픽 등급 기반 제어를 전술 환경에 맞게 발전하였다. 본 연구는 송신 흐름제어가 버퍼 점유도에 기반하여 임계치 초과 시 저우선 트래픽을 선별적으로 차단하는 필터링 방식을 채택하여 라우팅 계층에서 버퍼 가용량을 통

한 혼잡 회피까지 단일 계층 제어로 통합하고자 한다.

〈Table 1〉 Summary of previous studies on flow control techniques in ad-hoc networks

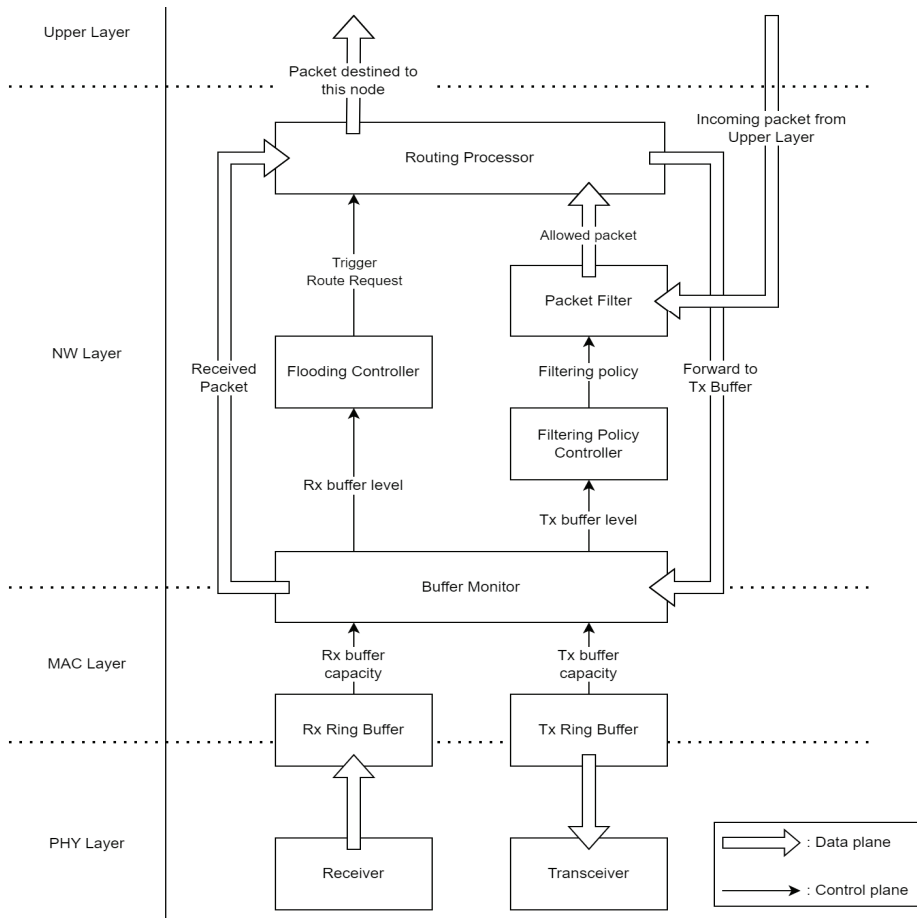
Study (Year)	Purpose	Key techniques	Key metrics	Control scope
Badis & Al (2005)	QoS Assurance	QoS Routing	QoS requirements (Delay, Bandwidth, etc.)	Routing (Path Selection)
De Couto et al. (2003)	Reliability (Link Quality)	Link quality-based routing	ETX (Expected Transmission Count / Packet Loss Rate)	Routing (Path Selection)
Ahn et al. (2002)	QoS Differentiation	Traffic type-based rate control	Traffic class (Real-time/Best-effort)	Sender-side / Node
Lee, Cho & Campbell (2003)	Load Balancing	Queue-based routing	Queue length (absolute value)	Routing (Path Selection)
Kumar et al. (2014)	Congestion Awareness	Multi-metric based routing	Throughput, MAC overhead, delay (multiple)	Routing (Path Selection)
Li & Cuthbert (2005)	Integrated QoS	Multipath + DiffServ + Traffic Control	Traffic Class (DiffServ)	Sender + Receiver (Integrated)
Lee & Kim (2025)	Real-time QoS	(m, k)-firm based packet scheduling	Traffic priority, delay urgency	Node (Queuing/Scheduling)
Kumar & Hu (2024)	QoS (UAV Environment)	Cross-layer routing (MAC/N W)	Stability, congestion, mobility, etc. (multiple)	Routing (Path Selection)

요약하면, 기존 연구는 단일 흐름제어 기법의 적용이나 특정 계층 간 협업에 초점을 두고 있으며, 일부 연구에서 다중 흐름제어 기법의 통합을 시도하였다. 그러나 버퍼 가용량 기반의 패킷 드롭 기법을 활용한 라우팅 과정을 반영하여 송수신 흐름제어를 동시에 수행하는 통합 기법에 관한 연구가 부족한 실정이다.

III. 흐름제어 모델

본 논문에서 제안한 흐름 제어 모델은 송수신 과정에 각각 흐름제어 메커니즘을 적용하여 MAC 계층 수준에서 혼잡 상황에 따른 트래픽 제어와 경로 최적화를 동시에 수행하는 구조이다(Figure 1). 수신 과정은 Buffer Monitor가 실시간으로 수신 버퍼의 가용량을 측정하고, 해당 정보를 Flooding Controller를 통해 Routing Processor(OLSRb)에 전달하여 수신 혼잡도를 라우팅 과정에 반영할 수 있다. 이를 통해 혼잡 노드의 경로를 회피할 수 있는 라우팅 결정이 가능하다. 송신 과정의 경우, Filter Policy Controller가 Buffer Monitor로부터 전달받은 송신 버퍼 상태에 따라 필터링 정책을 정하고, Packet Filter가 상위 계층에서 전달된 패킷을 우선순위 기반으로 필터링하여 허용된 패킷만이 Routing Processor를 거쳐 송신 버퍼로 전송된다.

각 기능 모듈은 Buffer Monitor를 중심으로 연결되며, 버퍼 상태 → 필터링/라우팅 정책 결정 → 트래픽 제어로 이어지는 구조를 가진다. 이때, Buffer Monitor는 버퍼 사용률을 측정·전달하는 역할 외에 측정된 버퍼 사용량을 정해진 임계 구간에 따라 레벨 형태로 단계화하여 상위 모듈에 전달한다. 이를 통해 수신 노드의 순간적인 버퍼 사용량 변화로 빈번한 경로 변경이나 송신 필터에서 과도하게 반복하여 변경되는 핑퐁 현상을 방지한다. 이러한 기법은 시스템의 안정성과 정책 적용의 지속성을 유지하고 일정 수준의 민감도를 보장하는 효율적인 흐름제어가 가능하다.

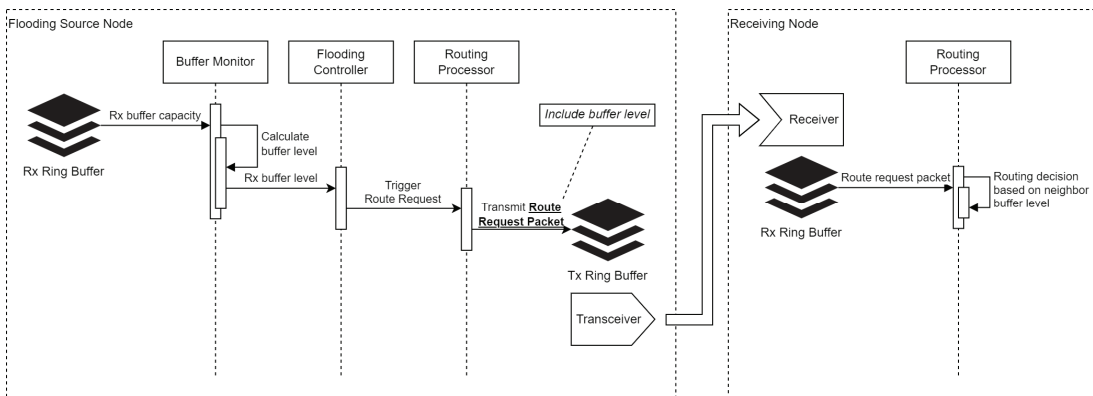


〈Figure 1〉 Cross-layer flow and buffer control architecture for tactical ad-hoc networks

3.1 수신 과정 흐름제어

수신 기반 흐름제어 기능의 작동 절차(Figure 2)는 자신의 수신 버퍼의 가용량 정보를 전달하는

소스 노드(Flooding Source Node)와 해당 정보가 포함된 TC 메시지를 수신한 인접 노드(Receiving Node) 간의 라우팅 제어 정보 교환을 중심으로 구성된다. Flooding Source Node의 Buffer Monitor는 수신 버퍼의 가용량을 주기적으로 측정하고, 이를 기반으로 현재 버퍼 상태를 정규화된 레벨로 계산한다. 이때 레벨은 사전에 정의된 임계 구간에 따라 단계화하며, 경로 변경의 과도한 민감도를 완화하고 라우팅 안정성을 유지할 수 있도록 설계한 요소이다. 계산된 버퍼 레벨은 Flooding Controller에 전달되며, Flooding Controller는 Routing Processor에 전달하여 라우팅 메시지를 생성할 때 해당 정보를 함께 포함할 수 있다. Routing Processor는 메시지 생성 시 현 노드의 수신 버퍼 상태를 패킷 내부에 포함하여 브로드캐스팅한다. 라우팅 메시지를 수신한 인접 노드는 패킷을 수신한 후 자신의 Routing Processor로 전달하며, 패킷에 포함된 송신 노드의 수신 버퍼 정보를 반영하여 라우팅 경로를 계산한다. 이를 통해 혼잡 상태에 있는 노드는 경로에서 회피되고, 상대적으로 수신 여유의 노드를 우선하여 선택하는 수신 혼잡 회피 기반 라우팅 결정이 가능해진다.



〈Figure 2〉 Flow control mechanism for packet reception in tactical ad-hoc networks

3.1.1 버퍼 기반 OLSR 확장(OLSRb)

본 연구의 OLSRb(OLSR-buffer-aware)는 기존 OLSR 프로토콜의 Topology Control(TC) 메시지 구조를 확장하여 수신 버퍼 가용량 정보를 라우팅 과정에 반영할 수 있도록 설계된 버퍼 인식형 라우팅 프로토콜이다. OLSRb는 기존 OLSR과 동일한 Hello 메시지 구조와 MPR 선택 알고리즘을 사용하며, TC 메시지에 버퍼 정보를 포함하여 최소한의 수정으로 라우팅 기반 수신 흐름제어를 실현한다.

1) TC 메시지 구조 확장

기존 OLSR의 TC 메시지는 MPR 노드가 주기적으로 생성하며, 자신과 연결된 MPR Selector 집합한다. OLSRb는 추가로 송신 노드의 수신 버퍼 가용량(buffer availability) 필드를 포함하여 인접 노드들이 해당 정보를 기반으로 혼잡 경로 회피를 수행할 수 있다(Table 2). 해당 필드는 바이트 단위

가용량 또는 정규화된 레벨로 구성될 수 있으며, 본 연구는 버퍼 가용량을 25% 단위³⁾로 나눈 레벨 값을 사용한다(0~25% : 1, 26~50% : 2, 51~75% : 3, 76~100% : 4).

〈Table 2〉 OLSRb Topology control (TC) message structure

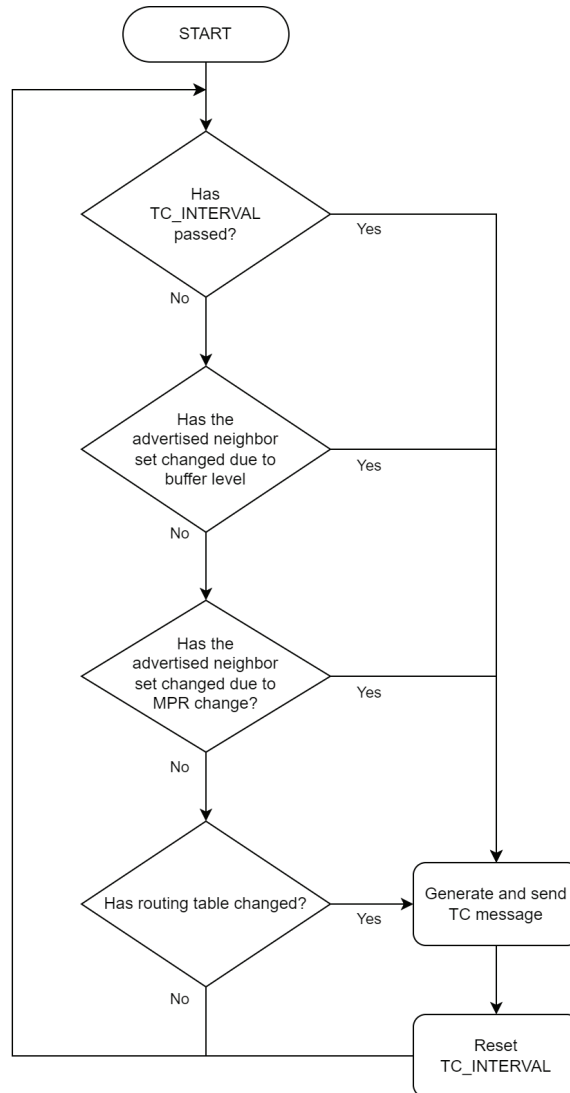
0	1															2															3														
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1														
Packet Length															Packet Sequence Number																														
Message Type					Vtime					Message Size																																			
Originator Address																																													
Time To Live					Hop Count					Message Sequence Number																																			
ANSN															Reserved																														
Advertised Neighbor Main Address																																													
Node Buffer Level																																													
Advertised Neighbor Main Address																																													
Node Buffer Level																																													

2) TC 메시지 송신 알고리즘

OLSRb에서 TC 메시지 송신 알고리즘은 Figure 3과 같다. 기본적으로 기존의 TC 전송 주기(TC_INTERVAL)에 따라 TC 메시지를 주기적으로 전송하며, 다음 조건 중 하나라도 충족되면 TC 메시지를 생성하여 전송한다.

-
- TC_INTERVAL이 경과한 경우
 - Advertised Neighbor Set에 변화가 발생한 경우
 - 수신 버퍼의 상태 변화로 인해 Buffer Level이 변경된 경우
 - 라우팅 테이블에 변화가 발생한 경우
-

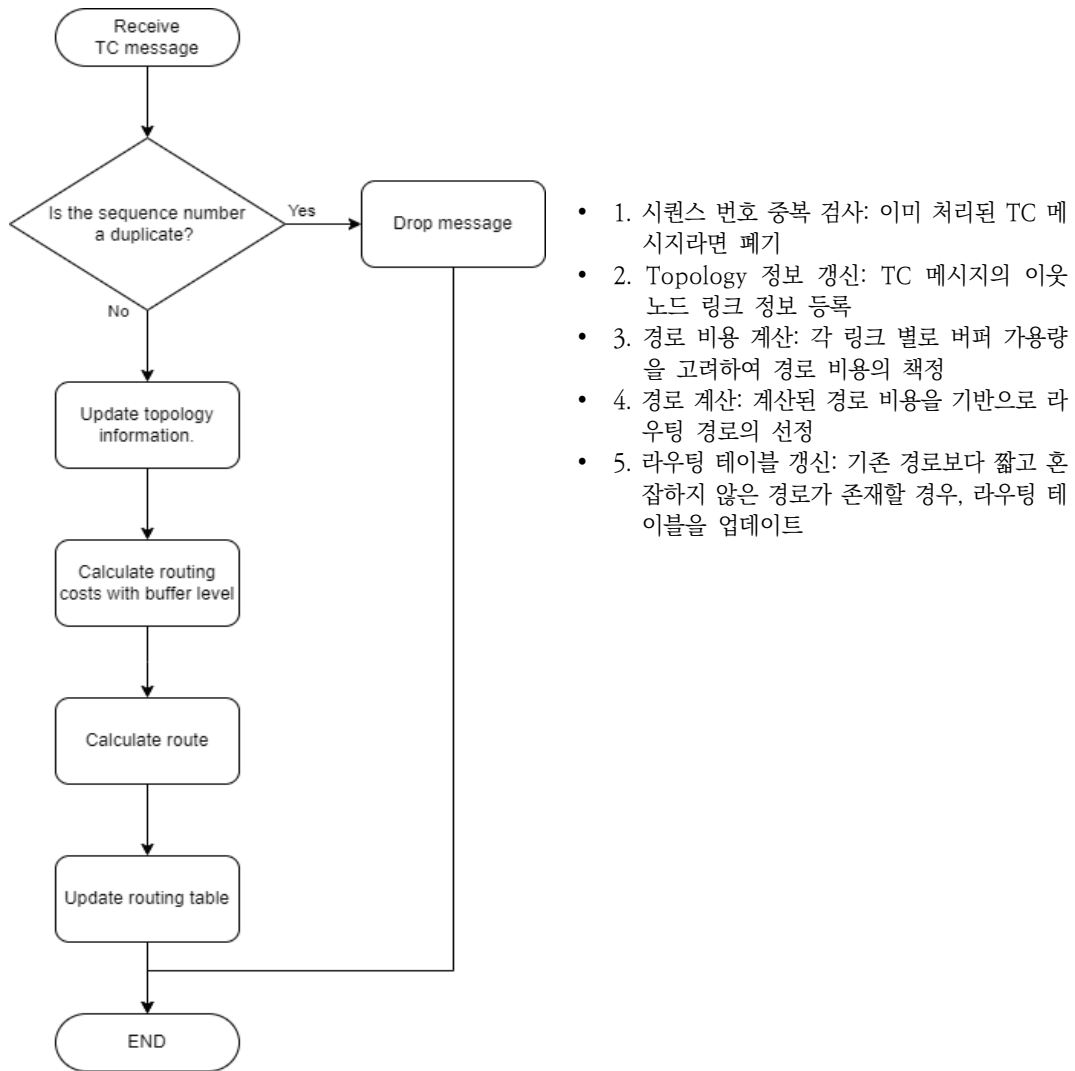
3) 25% 단위 구분은 버퍼 상태를 직관적으로 분류하기 위한 초기 설정임.



〈Figure 3〉 Flowchart of OLSRb topology control message transmission algorithm

3) TC 메시지 수신 알고리즘

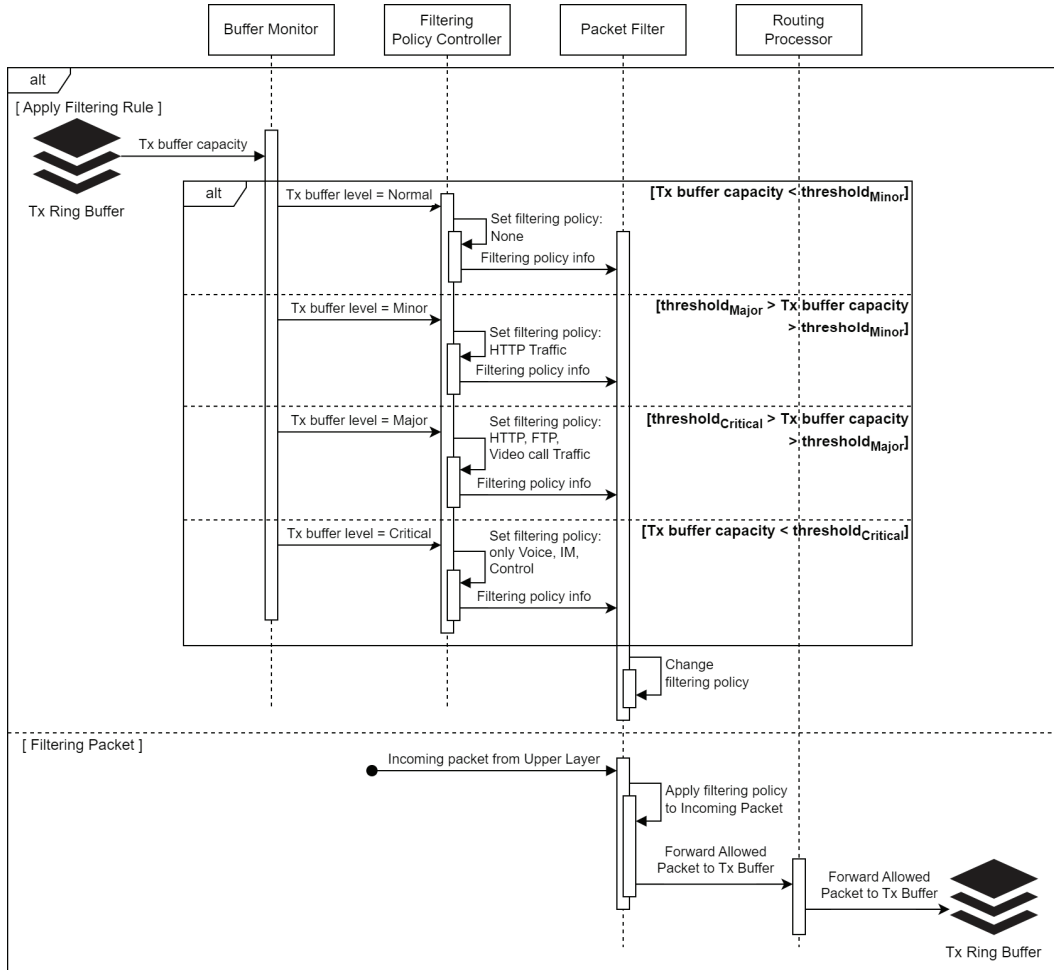
OLSRb에서 TC 메시지를 수신한 노드는 Figure 4의 절차에 따라 라우팅 테이블을 갱신한다. 이때, 노드별 버퍼 가용량을 경로 선정 과정에 반영하여 혼잡 노드를 경로에서 회피하도록 한다. 자세한 TC 메시지 수신 절차는 아래와 같다.



〈Figure 4〉 Flowchart of OLSRb topology control message reception algorithm

3.2 송신 과정 흐름제어

Figure 5는 송신 기반 흐름제어 기능이 작동하는 전체 절차이다. 해당 흐름은 상위 계층으로부터 전달되는 트래픽에 대해 송신 버퍼의 혼잡 상태를 기준으로 필터링 정책을 적용하는 과정을 중심으로 구성된다. 각 단계는 다음과 같이 수행된다. 송신 측 Buffer Monitor는 송신 버퍼의 가용량을 주기적으로 측정하며, 이 값을 기반으로 송신 혼잡 상태를 판단한다. 이때 송신 버퍼의 가용량은 수신 과정의 흐름제어와 마찬가지로 레벨 기반의 정규화를 통해, 상태를 구간화한다.



〈Figure 5〉 Sequence diagram of transmission flow control procedure

송신 과정의 흐름제어는 네 개의 단계(Normal, Minor, Major, Critical)로 구분된다(Table 3). 각 단계는 사전에 정의된 임계값($Threshold_{Minor}$, $Threshold_{Major}$, $Threshold_{Critical}$)을 기준으로 구분되며, 이는 정책의 과도한 전환을 방지하고 송신 제어의 일관성을 유지하기 위한 구조이다. 버퍼 레벨이 결정되면, Filtering Policy Controller에서 해당 레벨에 맞는 필터링 정책을 설정하게 된다. 예를 들어, Minor 상태에서 HTTP 트래픽을 우선적으로 제한하고, Major 상태에서 FTP 및 영상통화 트래픽도 필터링되며, Critical 상태는 음성, 제어 메시지, 메신저 트래픽만을 허용하고 나머지는 모두 차단된다. 이때 각 임계값은 $Threshold_{Minor} = 60\%$, $Threshold_{Major} = 75\%$, $Threshold_{Critical} = 90\%$ 로 설정하였다. 임계값과 트래픽 필터링 정책은 수신 과정 흐름제어의 버퍼 레벨과 마찬가지로 초기 설정이다. 이후 상위 계층으로부터 새로운 패킷이 전달되면, Packet Filter는 현재 적용 중인 필터링 정책에 따라 해당 패킷의 허용 여부를 판단한다. 필터링을 통과한 허용된 패킷은 Routing Processor를 거쳐 송신 버퍼로

전달되며, 이후 네트워크 내로 전송된다. 이런 방식은 송신 경로의 혼잡을 사전에 제어하고, 제한된 자원하에서도 중요 트래픽의 우선 전달과 QoS 유지가 가능하다.

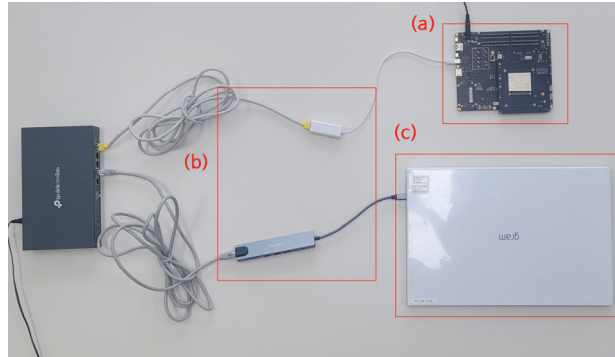
〈Table 3〉 Buffer capacity-level based normalization and buffer-state driven traffic filtering

	Range	Level	Filtering Traffic
ThresholdCritical = 90%	Tx buffer capacity < ThresholdCritical	Critical	Only Voice, IM, Control
ThresholdMajor = 75%	ThresholdCritical > Tx buffer capacity > ThresholdMajor	Major	HTTP, FTP, Video call
ThresholdMinor = 60%	ThresholdMajor > Tx buffer capacity > ThresholdMinor	Minor	HTTP
	Tx buffer capacity < ThresholdMinor	Normal	None

IV. 시뮬레이션 설정 및 구현

제안한 흐름제어 기법의 구현 가능성과 실효성을 확인하기 위해, D2D 환경에서 모의 단말 시스템을 구성하고 프로토타입 수준의 실험을 설정한다. 해당 실험은 실제 제어 흐름이 임베디드 시스템 상에서 동작 가능한지를 확인하고, 패킷 필터링 및 OLSRb 라우팅 프로토콜 기능의 실효성을 검증하는 데 목적이 있다.

패킷 필터링 실험(Figure 6)은 (a) C6490 EVKIT과 (b) USB NIC 기반 D2D 모델 모의 장치, (c) 시뮬레이터 PC로 구성하여 유선으로 연결한다. 시뮬레이터 PC는 SIP 트래픽 생성을 위한 Jami Softphone, HTTP, FTP 트래픽 생성을 위해 cURL을 사용한다. 송·수신 과정의 흐름제어 동작을 확인하기 위해 시뮬레이터 PC로부터 C6490 EVKIT 측으로 HTTP·FTP·SIP를 구성한 시험 트래픽을 주입해 부하를 점진적으로 증가하여 버퍼 점유도를 높이고, 패킷 필터링의 활성화를 확인한다. 이후 트래픽을 단계적으로 줄여 버퍼 점유도를 낮추고, 필터링이 해제됨을 확인한다.



〈Figure 6〉 Simulation settings

Note. (a) C6490 EVKIT, (b) NIC for Device-to-Device (D2D) modem emulation, (c) Simulation PC

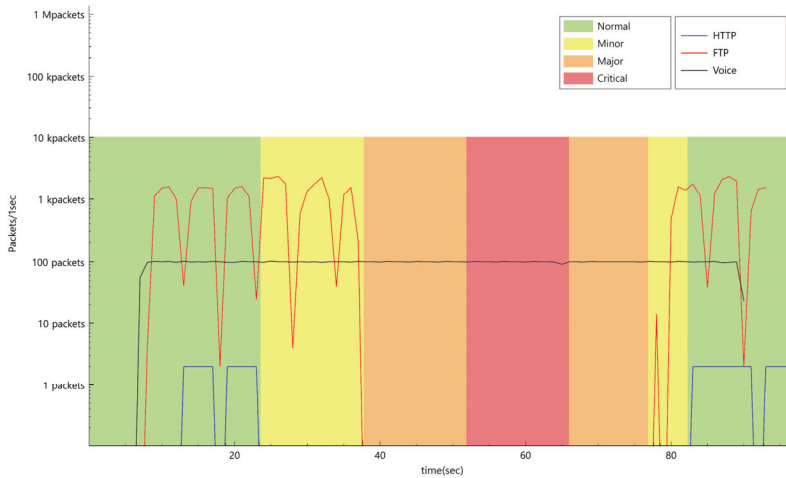
OLSRb 라우팅 프로토콜 실험은 ns-3 네트워크 시뮬레이터로 수행하였다. 500×500m 영역에 150개 노드를 중심부터 10m 간격으로 배치하고, 이 중 무작위로 선택한 20개 노드가 3Mbps에서 시작해 20초마다 0.5Mbps씩 증가시켜 최대 18Mbps까지 128KB 크기의 패킷을 전송하도록 설정하였다. 비교를 위해 동일한 환경에서 일반 OLSR과 OLSRb를 적용하여 각 20회씩 실험을 수행하였으며, 전송률 별 버퍼 오버플로로 인한 드롭 패킷 수를 측정·비교하였다. OLSR에서 라우팅 경로 계산에 최단 경로 알고리즘(shortest path algorithm)을 사용한다고만 명시되어 있으며, 특정 경로 비용 계산식, 혹은 최단 경로를 구하는 알고리즘을 규정하고 있지 않다.⁴⁾ 이에 해당 실험에서는 아래 수식 1과 같이 경로 비용을 책정하며, 최단 경로의 계산은 Dijkstra 알고리즘을 사용하였다.

$$cost = 1 + (bufferlevel/10)$$

수식(1)

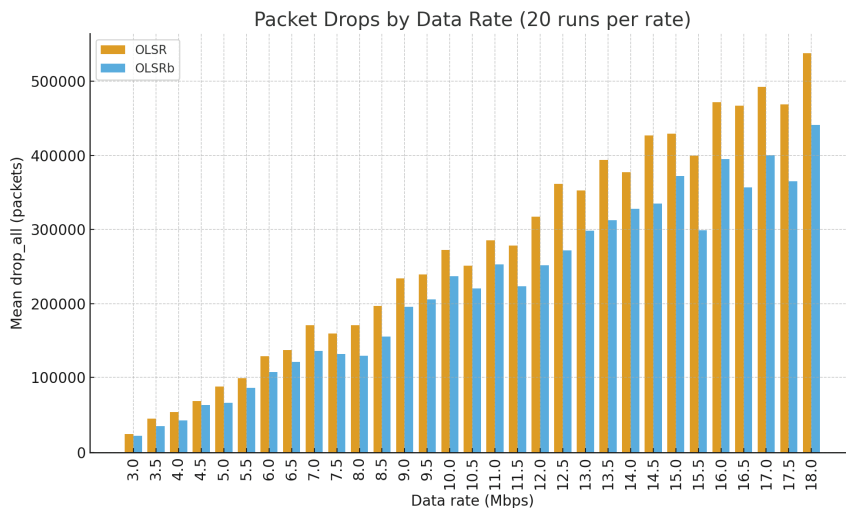
버퍼 점유율의 시간적 변화에 따라 송신 필터링 정책이 단계적으로 적용되는지 확인하기 위해 HTTP·FTP·음성 트래픽의 시간대별 송출 패턴을 관찰하였다. 송신 과정 흐름제어 기능을 통해 필터링된 트래픽의 패킷 결과를 보면(Figure 7), Minor 구간(23–37초, 76–82초)에서는 정책에 따라 HTTP 트래픽만 선택적으로 억제되고 FTP·음성은 유지되었으며, Major 및 Critical 구간(37–76초)에서는 HTTP와 FTP가 동시에 억제되고 음성만 지속 송출되어 정책의 우선순위가 정확히 반영됨을 확인하였다. 정상 구간(0–23초, 82초 이후)에서 모든 트래픽이 재개되어 차단·해제 동작이 원활하였다. 이로써 제안한 레벨 기반 송신 필터링은 버퍼 혼잡의 진전에 비례해 비필수 트래픽을 단계적으로 억제하고, 음성/제어 등 핵심 트래픽의 연속성을 보장하는 것으로 나타났다.

4) Optimized Link State Routing Protocol (OLSR), RFC 3626. <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3626.html>



〈Figure 7〉 Temporal distribution of traffic transmission in flow control simulation

제안한 버퍼-인지 라우팅(OLSRb)과 일반 OLSR의 전송률별 패킷 드랍량을 비교한 결과(Figure 8), 각 전송률 구간에 대한 평균 기준으로, 모든 전송률에서 OLSRb의 드랍량이 OLSR보다 적게 관측되었다. 전체 구간 평균에서 OLSRb는 OLSR 대비 드랍을 17.8% 감소시켰고(중앙값 기준 18.7% 감소), 레이트별 감소율은 최소 7.7%(4.5Mbps)에서 최대 25.4%(15.5Mbps) 범위로 나타났다. 특히 중·고속 구간(약 8.0~18Mbps)에서 감소폭이 크게(8.0Mbps:24.8%, 12.5Mbps:24.8%, 16.5Mbps:23.7%) 나타나 네트워크 부하가 높을수록 혼잡 노드를 회피하는 OLSRb의 효과가 두드러짐을 확인하였다.



〈Figure 8〉 Reception flow control performance in simulation

V. 결론 및 논의

본 논문의 목적은 전술 Ad-hoc 네트워크에서 빈번히 발생하는 혼잡과 지연 · 손실 문제를 완화하는 버퍼 가용량에 기반한 송신 · 수신 통합 흐름제어를 제안하는 데 있다. 송신 측은 버퍼 가용량에 연동된 우선순위 기반 패킷 필터링으로 중요 패킷을 우선하여 처리하고, 수신 측에서 OLSRb를 통해 라우팅 경로 계산 시 수신 버퍼 상태를 포함하여 혼잡 노드 회피를 유도한다.

검증 결과, 송신 측에서 버퍼 레벨 상승에 따라 HTTP→FTP 순으로 필터링을 단계적으로 적용하여 음성 · 제어와 같은 핵심 트래픽이 유지됨을 확인하였다. 또한, 수신 측에서 동일 조건에서 OLSR 대비 평균 17.8%(중앙값 18.7%)의 드롭이 감소하였고, 전송률 구간별로 최소 7.7%~최대 25.4% 감소가 관측되었다. 특히 중 · 고부하(약 8~18Mbps)에서 감소 폭이 크게 나타나 혼잡 회피형 경로 선택의 부하 민감도의 효용성을 입증하였다. 본 연구의 제안 기법은 필수 트래픽 연속성 보장과 혼잡 환경에서 손실 완화를 통한 트래픽 연속성의 보장으로 군사 작전 중에 끊김이 없는 통신 제공으로 성공적인 임무 수행을 지원할 수 있을 것이다. 그리고 혼잡 노드를 적극적으로 회피하는 방식은 네트워크 부하를 분산시켜 작전 수행 시간의 증대와 전체 시스템의 수명 연장에서 효과적일 것이다.

후속 연구는 실제 D2D 단말로 구성된 필드 환경에서 제안하는 흐름제어 기법을 적용하여 실제 트래픽을 발생시키며 수신/송신 흐름제어 임계값의 적정치를 추정하는 연구가 필요하다. 또한, 제안 기법의 성능을 PDR, Throughput, Delay, 전력 소모량 등으로 측정하여 끊김없는 통신을 통한 임무 생존성의 향상에 미치는 영향을 검증하는 연구설계로 확장할 필요가 있다.

Acknowledgements

This work was supported by Korea Research Institute for defense Technology (KRIT)-Grant funded by Defense Acquisition Program Administration (DAPA) (KRIT-CT-22-077, Development of integrated communication terminal and network technology for battlefield adaptive multi-layer communication).

Declaration of Conflicting Interests

The author(s) declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

Author contributions

Conceptualization: KJ and KD, Literature review: LD, OK, SS, KJ, and KD, Resources and Data curation: LD, OK, SS, KJ, and KD, Investigation and Methodology: LD and OK, Writing (Original Draft): LD, Project administration and Supervision: KJ and KD.

Reference

- Ahn, G.-S., Campbell, A. T., Veres, A., & Sun, L.-H. (2002). Supporting service differentiation for real-time and best-effort traffic in stateless wireless ad hoc networks (SWAN). *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 1(3), 192–207. <https://doi.org/10.1109/TMC.2002.1081755>
- Badis, H., & Al Agha, K. (2005). QOLSR: QoS routing for ad hoc wireless networks using OLSR. *Journal of Communications and Networks*, 7(1), 77–87. <https://doi.org/10.1109/JCN.2005.6182885>
- Cho, J., & Ryou, J. (2024). Tactical Network Development Plan for Utilizing Advanced Defense Technology. *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 25(3), 578–584. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2024.25.3.578>
- De Couto, D. S. J., Aguayo, D., Bicket, J., Chambers, B., & Morris, R. (2003). *A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing*. In Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom '03) (pp. 134–146). ACM. <https://doi.org/10.1145/938985.939000>
- Kanellopoulos, D. (2019). Congestion control for MANETs: An overview. *ICT Express*, 5(2), 77–83. <https://doi.org/10.1016/j.ict.2018.06.001>
- Kumar, M., Laxmi, V., Gaur, M. S., Ko, S.-B., & Zwolinski, M. (2014). *CARM: Congestion adaptive routing method for on chip networks*. In 2014 27th International Conference on VLSI Design (VLSID) and 2014 13th International Conference on Embedded Systems, pp. 240–245. IEEE. <https://doi.org/10.1109/VLSID.2014.48>
- Kumar, S., & Hu, F. (2024). Mobility-adaptive, cross-layer protocols for airborne networks with single/multi-beam directional antennas (Report No. AD1222323). San Diego State University Foundation. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/sti/html/trecms/AD1222323/>
- Lee, R., & Kim, B.-S. (2025). A packet scheduling technique based on (m, k)-firm guarantees for differential quality of service in tactical ad-hoc networks. *IEEE Access*, 13, 189270–189282. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3628221>
- Lee, S. B., Cho, J., & Campbell, A. T. (2003). HMP: Hotspot mitigation protocol for mobile ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 1(1), 87–101. [https://doi.org/10.1016/S1570-8705\(03\)00014-3](https://doi.org/10.1016/S1570-8705(03)00014-3)
- Li, F., & Cuthbert, L. (2005). *Optimal QoS Mechanism: Integrating Multipath Routing, DiffServ and Distributed Traffic Control in Mobile Ad Hoc Networks (IMDT)*. In *Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN 2005)*, LNCS 3794, pp. 538–549. Springer. https://doi.org/10.1007/11599463_55
- Lim, D.-H., Kim, S.-G., Kim, J.-S., & Kim, D.-H. (2025). A study on multi-layered communication

- network and AI-based seamless vertical handover technology in battlefield environment. *Journal of Korea Multimedia Society*, 28(1), 36–45. <https://doi.org/10.9717/kmms.2025.28.1.036>
- Nabben, K., & Rennie, E. (2022). Ad hoc network. *Internet Policy Review*, 11(2). <https://doi.org/10.14763/2022.2.1666>
- Paranjothi, A., Khan, M. S., & Zeadally, S. (2020). A survey on congestion detection and control in connected vehicles. *Ad Hoc Networks*, 108, 102277. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102277>
- Remondo, D. (2011). *Wireless ad hoc networks: an overview*. *Network Performance Engineering: A Handbook on Convergent Multi-Service Networks and Next Generation Internet*, 746-766. https://doi.org/10.1007/978-3-642-02742-0_31

전술 Ad-hoc 네트워크의 버퍼 기반 라우팅(OLSRb)과 트래픽 필터링을 이용한 통합 흐름제어 기법

임동현* · 오교상** · 신승훈*** · 김정훈**** · 김득화*****

국문초록

최근 군사 통신, 무인기 운용, 자율주행 등에서 Ad-hoc 네트워크 활용이 확대되면서 중앙 제어 없이 동적 환경에서도 안정적인 전송과 자원 효율을 보장하는 기술개발의 필요성이 높아지고 있다. 본 논문은 송신·수신 버퍼 가용량에 기반한 통합 흐름제어 기법을 제안한다. 송신 측은 버퍼 점유도에 따라 트래픽 우선순위 기반 패킷 필터링을 수행하며, 혼잡 시 저우선 트래픽을 선별적으로 차단하고 필수 트래픽을 보존한다. 수신 측은 OLSR 라우팅을 확장한 OLSRb(OLSR-buffer-aware)를 도입하여 수신 버퍼 가용 정보를 TC(Topology Control) 메시지에 포함하고 경로 계산 시 혼잡 노드를 회피하도록 한다. 제안 기법의 효용성은 두 단계로 검증하였다. (1) 송신 측의 검증은 버퍼 점유도를 인위적으로 변화하며 임계치 초과 시 저우선 트래픽의 차단과 필수 트래픽의 유지에 관한 기능적 성능을 확인하였다. (2) 수신 측의 검증 결과, 동일 조건에서 OLSRb와 기존 OLSR을 다양한 전송률로 비교하여 OLSRb가 패킷 드롭의 평균 17.8%의 감소가 나타났다.

주제어 : 전술 Ad-hoc 네트워크, 버퍼 가용량 기반 통합 흐름제어, 패킷 필터링, 버퍼 가용량 기반 라우팅 프로토콜

* (제1저자) 편집, SmartMove 팀, 전임연구원, bryan.dh.lim@funzin.co.kr, <https://orcid.org/0009-0004-9564-1763>.

** (공동저자) 편집, SmartMobility 실, 상무, david.ks.oh@funzin.co.kr, <https://orcid.org/0009-0004-4929-9995>.

*** (공동저자) 편집, 기업부설연구소, 전무 CTO, kyle.sh.shin@funzin.co.kr, <https://orcid.org/0009-0009-6391-9165>.

**** (교신저자) 편집, 사장, COO, marc@funzin.co.kr, <https://orcid.org/0009-0005-2433-996X>.

***** (교신저자) 편집, 대표이사, CEO, marc@funzin.co.kr, <https://orcid.org/0009-0006-5197-1247>.