

전술 애드 혹 네트워크에서 다중 홉 전송을 위한 자원 예약 및 백오프 기법

IEEE 802.11 MAC based Multi-hop Reservation and Backoff Scheme in MIMC Tactical Ad Hoc Networks

조 윤 철* 윤 선 중** 고 영 배***
Youn-Chul Cho Sun-Joong Yoon Young-Bae Ko

Abstract

In multi-interface multi-channel(MIMC) based tactical ad hoc networks, QoS support for required operational capacity is one of the main challenging issues for multi-hop transmissions. To support QoS in such a harsh environment, we propose a novel MAC scheme to minimize multi-hop as well as per-hop delay. The current IEEE 802.11 MAC protocols should contend to reserve the channel resource at every hop by each sender. The every-hop channel contention results in a degradation of end-to-end delay for multi-hop transmissions. The basic idea of our scheme is to make a “multi-hop reservation” at the MAC layer by using the modified RTS frame. It contains additional information such as destination information, packet priority, and hop count, etc. In addition, we differentiate the contention window area according to the packet priority and the number of hops to deliver packets in the predefined allowed latency. Our scheme can minimize the multi-hop delay and support the QoS of the critical data in real time(i.e., VoIP, sensing video data, Video conference between commanders). Our simulation study and numerical analysis show that the proposed scheme outperforms the IEEE 802.11 MAC.

Keywords : Tactical Ad Hoc Network(전술 애드 혹 네트워크), Multi-hop MAC(멀티 홉 MAC), Back-off(백오프), Multiple-interface Multiple-Channel(MIMC)

1. 서론

전술 애드 혹 네트워크는 차량, 전투원, 부대 등의

노드들이 무선으로 연결되어 지휘통제 및 상황인식 메
시지들을 공유한다. 열악한 전장환경에서 다양한 전술
데이터들이 정해진 시간 안에 전달되어 작전효과를
발휘할 수 있도록 하는 것은 전술 네트워크기반 프로
토콜 개발에 중요한 이슈이다. 현재 미국의 DARPA
(Defense Advanced Research Project Agency)에서 진행
중인 WNaN(Wireless Networks After Next)은 다중 채
널과 다중 인터페이스를 기반으로 보다 많은 데이터

† 2011년 10월 24일 접수~2012년 1월 27일 게재승인

* (주)엠에이

** 육군 전투지휘훈련단

*** 아주대학교(Ajou University)

책임저자 : 고영배(youngko@ajou.ac.kr)

를 보다 신속하게 전송할 수 있도록 사용기반의 하드웨어와 소프트웨어를 개발하는 프로젝트로 현재 개발이 진행 중에 있다^[1]. 우리군도 2013년 이후 전력화된 TICN(Tactical Information Communication Network)에서 TMMR(Tactical Multi-band Multi-role Radio)도 다중 채널 다중 인터페이스 기반으로 동작될 수 있도록 개발 중에 있다. 따라서 다중 채널/인터페이스의 장비로 구성된 전술네트워크에서 QoS를 향상시키도록 하는 것은 중요한 연구요소 중에 하나이다.

본 논문에서는 미 FCS(Future Combat System)의 SRW(Soldier Radio Waveform)에 적용을 고려하고 있는 CSMA/CA 방식의 IEEE 802.11 MAC 표준을 바탕으로 다중 인터페이스와 다중 채널 환경의 노드들로 구성된 전술네트워크에서 다중 홉의 전달지연시간을 단축시키고 QoS를 향상시키는 기법을 제안하였다^[2]. 기존의 IEEE 802.11 MAC 기반 네트워크에서는 각 홉마다 경쟁을 통한 자원 선점을 통하여 다중 홉의 목적지 노드까지 패킷이 전달되었다. 그 결과, 패킷이 목적지 노드까지 여러 홉을 거쳐서 전송될 경우에 각 홉마다 매번 경쟁을 거쳐야 하므로 제어 메시지들의 송수신과 패킷이 충돌할 경우에 백오프(Back-off) 시간의 증가 등으로 인한 중단간 지연시간이 증가하게 된다^[2]. 제안 기법의 기본개념은 IEEE 802.11 MAC의 CSMA/CA에서 사용되고 있는 RTS(Request-to-Send)와 같은 제어 프레임을 수정하여 다중 홉 예약을 가능하게 하는 것이다. 그리고 작전운용성능을 충족하기위해 사전 정의된 지연시간에 메시지가 목적지 노드에 도달할 수 있도록 경쟁 윈도우(Contention Window) 구간에서 우선순위와 홉 수에 따라 영역을 구분하여 QoS를 향상시키는 스킴을 제안하였다.

2장에서는 기본적인 IEEE 802.11 MAC 프로토콜 방식과 기존에 연구되었던 다중 홉 예약 전송방식들에 대해서 설명하고, 3장에서는 본 논문에서 제안하는 다중 홉 예약 및 백오프 기법에 대해서 설명하였다. 4장에서는 IEEE 802.11 MAC과 제안하는 기법 간에 수학적 분석 및 QualNet 시뮬레이션을 통한 성능을 비교하고, 5장에서는 결론을 제시하였다.

2. 연구배경 및 관련연구

가. IEEE 802.11 기반의 MAC 프로토콜 개요
무선 네트워크는 유선의 이더넷(Ethernet)과는 다르게

경계가 불명확하여 본인 노드의 전파가 단지 않는 지역의 노드와의 관계에서 Hidden Terminal Problem이 발생할 수 있다. 이를 해결하기 위하여 IEEE 802.11 MAC 프로토콜에서는 RTS와 CTS(Clear-to-Send)를 전송하여 노드의 송/수신 상태를 확인하여 데이터의 충돌을 회피하도록 한다. MAC의 접근 모드는 이더넷과 같은 CSMA/CA에서 사용되는 DCF(Distributed Coordination Function)와 PCF(Point Coordination Function)방식이 있다. DCF는 경쟁기반의 전달 방식으로서 백오프(Back-off)를 사용하여 일차적으로 충돌을 회피하고, RTS와 CTS를 사용하여 충돌의 가능성을 최소로 줄인다. 반면, PCF는 무경쟁 전달 방식으로 노드들로 하여금 더 짧은 기간 후에 프레임 전송하는 것을 허용한다. 하지만 PCF는 현재 거의 구현되어 있지 않다^[7].

Fig. 1은 IEEE 802.11 MAC의 DCF 전송방식을 간단하게 나타낸 그림이다. B 노드가 C 노드에게 패킷을 전송하고 있다고 가정한다면, A 노드가 D 노드에게 전송할 패킷이 생성 되어도 A와 D 노드는 패킷을 전송하거나 수신할 수 없다. 그 이유는 B와 C 노드가 패킷을 전송할 때 설정되는 NAV(Network Allocation Vector) 때문이다. NAV는 가상 반응과 탐지(Virtual Carrier-Sensing)에 사용되는 것으로, 해당 정보는 B 노드와 C 노드에서 RTS와 CTS 프레임에 포함되어 전송된다. IEEE 802.11 MAC 프레임 안에는 NAV 설정을 위한 Duration Field가 포함된다^[8]. 이 Duration Field는 패킷이 전송되는데 필요한 시간을 지정하여 해당 시간 동안 타 노드들이 자원을 사용하지 못하도록 한다. 수식 (1)은 RTS 프레임 포함되는 NAV 값을 나타낸 것이다.

$$RTS_NAV = 3 \times SIFS + CTS + DATA + ACK \quad (1)$$

$$CTS_NAV = 2 \times SIFS + DATA + ACK \quad (2)$$

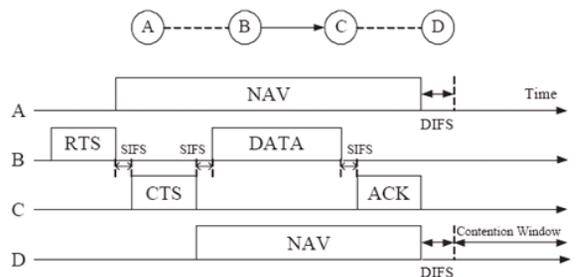


Fig. 1. IEEE 802.11 MAC 동작 예

B 노드가 C 노드에게 RTS 프레임을 전송할 때에 NAV 정보를 주변의 노드들에게 알려주듯이, C 노드는 CTS 프레임 전송할 때에 NAV에 대한 시간 정보를 포함하여 주변 노드들에게 알려주게 된다. 수식 (2)는 CTS 프레임에 의한 NAV의 계산식을 나타낸 것이다. 이러한 NAV 시간 설정은 동일 채널로 다중 홉 전송의 경우 QoS와 처리량(Throughput)을 감소시키는 결과를 발생하게 된다.

Table 1. 노드 4개를 일렬로 배치한 토폴로지에서의 지연시간 측정

	Single channel / interface	Two channels / interfaces	Three channels / interfaces
End-to-end delay(ms)	11.88	11.11	10.69

Table 1은 4개의 노드들을 일렬로 배치하고 채널과 인터페이스의 개수에 변화를 주면서 종단간 지연시간을 Qualnet 시뮬레이션을 통하여 측정된 결과 값이다. SRW로 구성된 전송 애드 혹 네트워크를 고려하여 데이터 전송 속도(Data Rate)는 2Mbps로, 패킷의 크기는 512bytes로 설정하였다. 데이터는 A 노드에서 시작하여 D 노드까지 전송되고, 각 패킷들의 생성 주기는 10ms로 설정하였다. 다음과 같은 환경에서 측정된 단일 홉간의 지연시간은 평균 3.43ms이었다. 또한 두 개의 인터페이스와 채널을 사용했을 경우에는 A 노드와 C 노드는 같은 채널을 사용하여 패킷을 전송하고 B 노드는 다른 채널을 사용하여 패킷을 송신하였다. 세 개의 인터페이스와 채널을 사용할 경우에는 모든 노드들이 모두 다른 채널을 사용하여 패킷을 송신 하였다. 측정 결과, 하나의 인터페이스와 채널을 사용하였을 경우에 지연시간이 가장 컸는데, 그 이유는 Exposed Terminal Problem과 같은 다중 홉으로 전송되는 패킷들 간의 Intra Interference 때문이다.

Table 1의 결과에서 알 수 있듯이, 여러 개의 인터페이스와 채널을 사용한다면 다중 홉 전송에 있어서 종단간 지연시간을 감소시킨다는 것을 알 수 있다. 1장에서 설명되었듯이 전송네트워크 노드를 개발할 때 TMMR과 같이, 다중 채널, 다중 인터페이스를 운용할 수 있도록 개발되고 있다. 그러나 다중 채널과 인터페이스를 사용한다 하더라도, 단일 홉 통신을 위해 개발

된 IEEE 802.11은 데이터를 전송시 항상 자원점유 경쟁을 위한 지연시간이 발생한다. 그 이유는 IEEE 802.11은 데이터를 전송할 수 있도록 자원을 확보하기 위해 항상 RTS와 CTS를 주고받기 때문이다. 이는 패킷을 다중 홉으로 전송할 경우에 지연시간을 증가시키는 요소 중에 하나가 된다.

또한, RTS를 전송하여 자원을 선점시 현재의 IEEE 802.11의 경우에는 우선순위를 비롯한 여러 정보들의 내용을 참조하지 않고 채널 및 인터페이스의 충돌이 일어났을 경우 경쟁 윈도우 구간에서 모든 백오프 범위에서 임의적으로 시간을 돌려 경쟁을 시도한다. 이러한 방식은 충돌이 일어난 후에 우선순위가 높거나 지정된 시간이 다 되어가는 메시지가 백오프 경쟁에서 지게 될 경우에 지정된 시간 안에 메시지가 도착하지 못하여 QoS를 만족하지 못하게 되는 상황이 발생한다.

Table 2. 전송 데이터 유형별 허용지연시간^[11]

특성	허용지연시간(time limit)
Real-Time	< 250ms
Non-Real-Time but Time-Critical	250ms ~ 10 second
Non-Real-Time, Lower Priority	10 second ~ 1 minute
Best Effort	> 1 minute

NATO C3 Agency에서는 군 무선통신에서의 데이터별 허용지연시간(Time Limit)을 Table 2와 같이 정의하였다. 허용지연시간이란 해당 메시지가 작전효과를 발휘 하도록 하기 위해서 목적지 노드까지 도달해야 하는 허용 가능한 최대 지연시간이다. 이러한 상황에서 지정된 시간 안에 메시지를 수신하기 위하여 IEEE 802.11e에서는 메시지 우선순위에 따른 차별화를 주기 위해 다중 큐를 두고 메시지의 종류에 따라 백오프 시간의 구분을 주어 자원을 점유하도록 하는 기법을 적용하였다. IEEE 802.11e에서는 패킷 종류에 따라 패킷을 네 가지로 구분하여 Contention Window(CW) 영역을 나누어, 주어진 영역 안에서 자원 선점을 위한 경쟁이 이루어진다. 하지만, IEEE 802.11e의 경우에도 1홉을 기준으로 스킴이 개발되었기 때문에 목적지 노드가 원거리에 존재하는 경우와 근거리에 존재하는

경우 모두 동일한 백오프 기법이 적용되어 원거리에서 존재하는 목적지 노드까지의 허용지연시간을 최대한 만족하도록 하고자 할 경우 제한사항은 여전히 존재한다.

나. 기존 다중 홉 전송기법에 대한 연구

기존의 많은 연구들이 IEEE 802.11 MAC을 이용하거나 수정하여 이동 애드 혹 네트워크에서 다중 홉으로 데이터를 전송하여 종단간 지연시간을 줄이고 처리량을 높이기 위한 연구가 활발히 진행되어왔다. [3]에서는 DCMA(Data driven Cut-through Multiple Access) 기법이 제시되었다. DCMA는 MPLS(Multi Protocol Label Switching)와 패킷이 네트워크에 전송될 때 생성되는 라벨을 이용하여 통신을 수행하며, IEEE 802.11에서 사용되는 4-way 핸드셰이킹(handshaking)방식을 향상시킨 기법이다. IEEE 802.11이 RTS, CTS, DATA 그리고 ACK을 따로 보내는 방식이라면, DCMA는 ACK와 RTS를 하나로 묶는 프레임을 정의하였으며, 이 프레임은 ACK와 RTS의 기능을 합쳐 보내는 다중 홉 전송방식이다. ACK/RTS 프레임은 ACK과 RTS 프레임을 수신할 노드들의 각각의 주소를 포함한다. 이러한 방식으로 하나의 ACK/RTS 프레임이 ACK과 RTS가 따로 처리해야 할 작업을 한번에 처리하여 종단간 지연시간과 처리량이 증가하는 결과를 얻을 수 있다. 하지만, 이 기법은 하나의 채널을 사용함으로써 다중 홉으로 전송시에 Exposed Node Problem이 발생 할 수 있다.

[4, 5]에서는 하나의 인터페이스를 가지고 채널 4개를 사용하는 환경에서 CAPS(Channel Access over Path Segments) 기법을 제시하였다. 채널 4개 중에 하나는 제어 메시지 전송을 위한 제어 채널로 사용된다. CAPS는 하나의 다중 홉 경로에서 여러 채널의 데이터를 수신할 수 있다. CAPS는 새롭게 제시한 S-RTS(Segment Request-To-Send)를 통하여 각각의 홉들에 예약하는 기법으로, 소스(Source) 노드에 의해서 생성되는 S-RTS는 목적지 노드에 도착하거나 다른 패킷에 의하여 이미 진행되고 있는 플로우(Flow)를 만날 때까지 전송하게 된다. S-RTS에는 홉 카운트와 소스 노드의 주소, 중계 노드의 주소 등이 포함되어있으며 RTS와 ACK의 기간 필드(Duration Field)는 삭제되었다. 이 기법은, 제어 메시지의 경우 매 홉마다 거쳐가는 형태로 전송되지만, DATA 프레임은 파이프라인(Pipeline)모드로 목적지까지 연속적으로 전송되게 된다. 이 기

법에서 다중 홉들의 모든 채널들은 서로 다른 채널을 사용하며, 물리 계층에서 라우팅 테이블이 저장되는 크로스 레이어(Cross Layer) 구조를 사용한다. 하지만 이로 인하여, 기존의 IEEE 802.11 MAC과의 호환성이 떨어진다.

[6]에서는 채널할당 기법과 FMH(Fast Multi-Hop) MAC을 제안하였다. 이 기법은 제어 메시지를 위한 채널과 데이터를 위한 채널을 나눠놓고 다중 채널과 다중 인터페이스 환경을 기반으로 제안되었다. FMH - MAC은 두 가지 기법으로 구성되어 있는데, FFNM(Fast-Forward Negotiation Mode) 방식과 BNM(Basic Negotiation Mode)으로 구성되어 있다. FFNM은 컷 스루(Cut-through) 방식으로 다중 홉 토폴로지에서 빠른 데이터 전송을 제공하는 방법이다. FMH-MAC은 RTS와 CTS의 기능을 합친 RCTS 프레임을 사용한다. RCTS 프레임에는 플로우 식별자와 데이터 채널의 번호, 예약 기간에 대한 필드가 추가된다. 만약, RCTS를 수신한 노드에서 RCTS에 안에 선택된 데이터 채널이 이미 사용중일 경우에는, RCTS 프레임을 수신한 노드가 해당 채널을 사용할 수 없다는 NCTS 프레임을 응답 메시지로 전송한다. NCTS 프레임에는 RCTS에 선택된 채널이 사용될 수 있는 시간을 포함한다. 하지만, 군 환경에서 재밍이나 간섭 등으로 인하여 제어 메시지 채널을 사용하지 못하게 될 경우, 데이터 채널도 같이 사용할 수 없게 되는 문제가 발생한다.

3. 다중 홉 자원 예약 및 백오프 기법

본 논문에서는 두 가지 기법을 제안한다. 먼저 다중 채널 및 인터페이스를 사용하는 네트워크에서 IEEE 802.11 기반의 MAC 프로토콜을 사용하여 종단간의 지연시간을 줄이는 다중 홉 예약 전송 기법을 제안한다. 이 제안기법은 세 개의 인터페이스를 가지고 세 개의 고정 채널의 송수신이 가능한 인터페이스를 사용하는 멀티인터페이스/멀티채널(MIMC) 환경을 고려하였다. 한 노드가 패킷을 다음 노드로 전송시 현재 패킷을 전송하고 있거나 NAV 상태에 있는 채널의 인터페이스를 제외하고 유희상태의 채널을 이용하여 패킷을 전송하는 방식으로 동작된다. 예를 들면 선형 토폴로지서 연속 3홉으로 패킷을 전송 시에 1홉 구간에서 채널 1을 사용하면 2홉 구간은 채널 2,3 중 하나를 선택하여 전송하고, 만약 2홉에서 채널 2를 선택하였다면, 3

홉 구간에서는 채널 1의 경우 첫 번째 홉에서 이미 사용중임으로 반송과 감지(Carrier Sensing) 범위에 포함되어 있어 NAV이 설정되고, 채널 2는 전 홉에서 사용되었으므로 채널 3을 선택하여 패킷을 전송하게 된다. 만약 모든 인터페이스가 사용중인 상태이면 사용 가능한 인터페이스가 발생할 때까지 대기 후 이 인터페이스를 이용 패킷을 전달한다. 이 다중 홉 예약 전송기법은 IEEE 802.11에서 사용되는 기본 RTS 프레임에 목적지의 IP 주소, 홉 카운트 등의 정보들을 추가한 MH-RTS(Multi-Hop RTS) 프레임을 제안한다. 이렇게 제안된 MH-RTS 프레임은 다중 홉의 예약을 할 수 있는 정보를 지원한다. 또 다른 제안 기법은 QoS를 만족하기 위하여 백오프를 조정하여 지정된 제안 시간 안에 더 많은 패킷이 목적지에 도달할 수 있도록 한다.

가. 다중 홉 자원 예약

Fig. 2는 다중 채널과 다중 인터페이스를 사용하는 IEEE 802.11 MAC과 본 논문에서 제안하는 기법간 중단간 지연시간의 차이를 보여주는 그림이다. Fig. 2. (a)는 표준인 IEEE 802.11 MAC이 멀티인터페이스/멀티채널 환경에서 서로간의 통신상황을 보여주는 그림이다. 표준에서는 노드가 RTS/CTS를 통하여 채널과 인터페이스를 선점하고 데이터를 전송하며, 데이터를 수신 받는 노드는 데이터 수신이 끝난 이후에 데이터를 확인하여 다음 노드를 확인하고 RTS를 전송하여 채널과 인터페이스를 선점하는 형태로 진행된다. Fig. 2. (b)는 본 논문에서 제안하는 기법으로 RTS를 수신한 노드는 발신 노드에게 CTS로 응답하고 RTS에 추가된 정보들을 이용하여 다음 노드의 정보를 가져와 데이터가 수신되기 이전에 RTS/CTS를 통하여 다음 노드로의 자원을 미리 선점하여 데이터를 수신하면 바로 다음 노드에게 수신할 수 있는 방식으로 진행된다.

Fig. 2. (a)에서 지연시간이 큰 이유는 앞서 설명하였듯이 IEEE 802.11 MAC의 경우에 매 홉마다 데이터를 전송하기 이전에 RTS와 CTS 프레임 교환을 통한 경쟁 기반 전송 기술이기 때문이다. 이러한 방법은, 전송에 필요한 홉의 개수가 늘어나거나 트래픽의 양이 많아질수록 중단간 지연시간이 더욱 증가하게 되는 문제점이 있다. 반면에, 본 논문에서 제안하는 기법은 목적지 노드까지 다중 홉의 링크를 미리 예약하는 방식으로써 데이터를 빠르게 전송할 수 있기에

Fig. 2. (b)처럼 Fig. 2. (a)보다 지연시간이 더 단축될 수 있다.

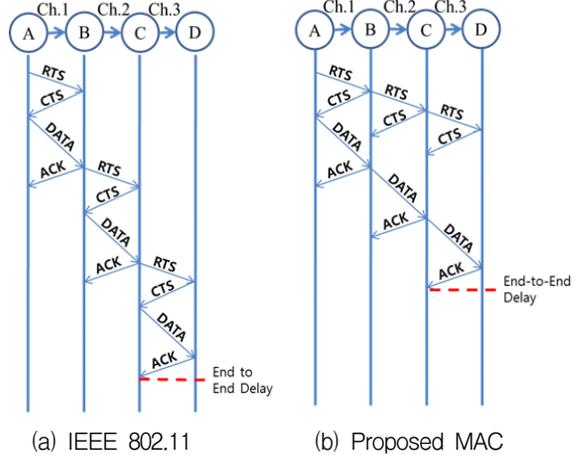


Fig. 2. IEEE 802.11과 제안기법의 지연시간 비교

Fig. 2에서 볼 수 있듯이 본 제안 기법인 예약기법을 사용했을 경우에 기존의 방식보다 중단간 지연시간을 감소시킬 수 있으며, 지연시간의 감소는 처리량의 증가로 이어진다. 이를 통해 더 나은 QoS를 지원할 수 있다.

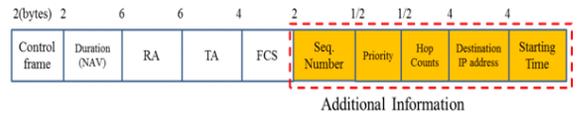


Fig. 3. MH-RTS(Multi Hop RTS) 프레임 구조

하지만, 단일 홉으로 전송되던 기존의 RTS 프레임의 정보만으로는 RTS 프레임을 다중 홉으로 전송할 수 없다. Fig. 3은 다중 홉을 지원하기 위하여 본 논문에서 제안하는 MH-RTS 프레임의 구조이다. IEEE 802.11 MAC의 RTS 프레임은 제어 프레임, 기간 필드, 수신 노드의 MAC 주소, 송신 노드의 MAC 주소와 FCS(Frame Check Sequence)로 이루어져있다. 하지만, 기존의 RTS 프레임은 단일 홉 기준의 방식이기에 다중 홉 전송을 위해서는 기존의 RTS 정보 외의 추가 정보가 필요하다. 추가 정보로서 시퀀스 제어번호는 데이터의 제어 번호로서 데이터 패킷에 상응하는 RTS를 구분하기 위한 필드이며, 매 홉마다 카운트를 늘려가는 홉 카운트, 패킷의 중요성을 나타내는 우선순위,

그리고 네트워크 계층에서 받아온 최종 목적지 IP 주소이다. 마지막으로 패킷이 생성된 시간인 Starting Time은 백오프 경쟁시에 사용된다. 본 논문에서 메시지의 우선순위는 Table 2에서 구분 한 것과 같이 특성에 따라 4단계로 구분한다. 우선순위는 홉 카운트와 같이 백오프(Back-off) 계산에 사용된다. 예를 들어, 무인항공기(UAV : Unmanned Aerial Vehicle)로부터 수집된 데이터가 중요한 정보로서 높은 우선순위를 가진다면 제안 기법은 최소한의 지연시간을 가지도록 높은 우선순위(0)로 패킷을 설정하고 전송을 시도할 것이다.

제안 기법에서 사용되는 RTS에 따른 NAV설정은 두 가지 상황에 따라 다르게 설정된다. 먼저, $(RTS + CTS + SIFS) < DATA$ 일 경우에는 수식 (3)의 방식으로 계산되며, $(RTS + CTS + SIFS) \geq DATA$ 의 경우에는 기존의 방식인 수식 (1)의 방식으로 계산된다. 여기서 사용되는 N은 홉수를 나타내는 것으로, 데이터를 생성한 소스 노드로부터 현재의 노드까지 지나온 홉의 개수이다. 수식 (4)는 제안 기법의 CTS에 따른 NAV 계산 방식이다.

$$\text{MultihopRTS_NAV} = (2 \times \text{SIFS} + \text{CTS} + \text{ACK}) + N \times \text{DATA} - (N - 1) \times \text{RTS} \quad (3)$$

$$\text{MultihopCTS_NAV} = (\text{SIFS} + \text{ACK}) + N \times \text{DATA} - (N - 1) \times \text{RTS} \quad (4)$$

IEEE 802.11 표준에서는 노드가 RTS 프레임 수신하면 RTS 프레임을 송신한 노드에게 CTS 프레임을 송신하고 DATA 프레임을 기다린다. 하지만, 제안 기법의 MH-RTS 프레임을 수신한 노드는 MH-RTS 프레임을 송신한 노드에게 CTS 프레임을 전송하여 응답하고, 그 이후 MH-RTS 프레임의 추가 정보들을 상위 계층으로 전송한다. 네트워크 계층에서는 추가 정보들을 DATA 프레임처럼 인식하고 DATA와 같은 방식으로 처리 과정을 진행한다. 먼저, 목적지 IP 주소와 노드 자신의 주소를 비교한다. 만약 목적지 IP 주소가 같다면 노드가 목적지임으로 추가 정보들을 모두 버리고 DATA 프레임을 기다린다. 반면에, 목적지 IP 주소와 자신의 IP 주소가 다르다면 노드는 중간 노드로서 패킷을 전송할 다음 노드를 찾는다. 다음 노드의 주소를 찾기 위해서 자신의 라우팅 테이블(Routing Table)을 참조하여 다음 노드의 IP 주소를 찾아오고, 이렇게

찾은 IP 주소를 바탕으로 ARP(Address Resolution Protocol) 테이블에서 MAC 주소를 검사한다. 만약 ARP 테이블에 다음 노드의 MAC 주소가 존재하지 않는다면, 해당 노드는 ARP 요청 패킷을 브로드캐스팅(Broadcasting)하여 데이터 패킷이 도착하기 전에 MAC 주소를 찾는 작업을 실행한다. 모든 작업을 마쳤다면, MH-RTS의 추가 정보들을 갱신하여 데이터링크 계층으로 전송한다. 데이터링크 계층에서는 네트워크 계층으로부터 정보를 받은 후에 홉 카운트를 하나 증가시켜 완성된 MH-RTS 프레임을 다음 홉으로 전송하여 채널 및 인터페이스를 선점하는 작업을 실행한다. 하지만, 네트워크의 상황에 따라 하나의 노드에 두 개 이상의 패킷 흐름이 발생할 수도 있다. 이러한 경우에는 동시에 송/수신을 하기 위해서는 네 개의 인터페이스와 채널이 필요하게 되므로 두 개의 패킷을 동시에 송/수신을 할 수 없는 상황이 발생하게 된다. 따라서 채널 및 인터페이스 자원을 선점하지 못한 노드는 자신이 가용할 수 있는 채널 및 인터페이스가 생길 때까지 패킷의 전송을 대기하게 된다. 이후, 가용할 수 있는 채널 및 인터페이스가 생긴다면 자원을 점유하여 패킷을 전송하게 된다.

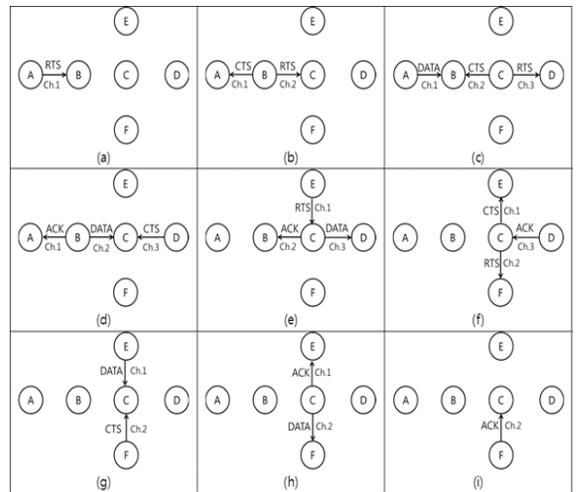


Fig. 4. 십자형 토폴로지에서의 패킷 흐름 예

Fig. 4는 하나의 예로서, 십자 형태의 토폴로지에서도 두 개의 패킷 흐름이 발생하였을 경우를 나타낸 그림이다. 만약 하나의 패킷 흐름만 발생된다면 Fig. 4. (d)와 같은 형태로 진행되고 아무 문제없이 데이터가 전송되어 모든 프로세스가 끝나게 될 것이다. 하지만,

두 개의 패킷 흐름이 발생된다면 Fig. 4의 C단말과 같이 흐름이 겹치는 노드가 발생하게 된다. 우선 DATA의 크기는 RTS와 CTS를 합한 크기보다 크고, 각 단말의 인터페이스마다 채널이 할당되었다고 가정한다. Fig. 4는 A 노드에서 D 노드로 패킷 전송이 이뤄지고 있을 때, E 노드가 F 노드로 패킷 전송을 시도하는 경우이다. 그 결과 C 노드에서 두 개의 패킷이 겹치게 된다. 본 논문에서 제안하는 기법은 MH-RTS를 수신하였을 경우 가용이 가능한 채널과 인터페이스를 사용하여 다음 노드에게 MH-RTS를 송신하여 채널 및 인터페이스를 미리 할당하게 된다. 그 결과, Fig. 4. (d)까지는 일반적으로 진행되나 Fig. 4. (e)에서 E 노드가 F 노드로 패킷 전송을 시도하게 되어 C 노드는 채널 1번은 E 노드와 채널 2번은 B 노드와 채널 3번은 D 노드와 예약된 상태로서 세 개의 채널 및 인터페이스를 모두 사용하는 상태가 된다. 이럴 경우 노드 C는 MH-RTS 프레임이 큐(Queue)에 쌓아두고 하나의 채널 및 인터페이스가 사용이 끝나 가용 할 수 있는 상태가 될 때까지 대기하게 된다. Fig. 4. (f)에서 B 노드에서의 DATA 전송이 먼저 끝나게 되면 C 노드는 F 노드에게 B 노드와 사용하였던 채널 2번을 이용하여 큐에 쌓여있던 MH-RTS를 전송하여 자원을 선점한다. 하지만, 만약 네트워크의 토폴로지가 더욱 복잡해져 패킷 흐름이 동시다발적으로 발생된다면 패킷이 겹치는 노드들이 늘어나 결국 지연시간이 증가하게 된다. 하지만, 아무리 크고 많은 최악의 패킷 흐름이 발생되어도 데이터 수신 이후에는 MH-RTS를 전송할 수 있기에 기존의 IEEE 802.11과 비슷한 성능의 결과를 가져올 수 있다. 그러나 2홉 이상 자원예약을 하여 전송하게 되는 경우에는 기존의 기법보다 지연시간이 감소하게 된다.

나. QoS 지원을 위한 멀티 홉 백오프(Back-off) 기법

동적인 전장 환경에서 작전의 형태가 복잡해질수록 전술 애드 혹 네트워크에서는 많은 메시지들이 발생되고 전달된다. 위에서 설명 되었던이 전술네트워크가 다중 인터페이스 다중채널 환경에서 동작되어도 제한된 자원으로 인하여 메시지를 전송하는 각 노드들은 다른 메시지를 전송하려는 노드들 간에 자원 선점을 위한 경쟁이 이루어진다. 기존 IEEE 802.11e 기반 MAC에서는 메시지의 우선순위에 따라 경쟁 윈도우 영역을 구분해서 전송하는 기법을 적용하여 QoS를 보

장할 수 있도록 지원하고 있는데, 이 IEEE 802.11e 기법 역시 단일 홉 구간에서 적용되는 것을 원칙으로 하고 있어 다중 홉 환경의 전술네트워크에 적용하기에는 제한사항이 있다. 예를 들어, 우선순위가 동일한 상황에서 7홉을 거쳐 목적지에 도착해야 하는 메시지와 목적지까지 3홉이 소요되는 메시지가 자원 점유를 위한 경쟁을 한다면, 기존 방식의 경우 해당 경쟁 윈도우 구간에서 임의적으로 경쟁을 실시하게 되어, 3홉이 소요되는 메시지는 빨리 도착하고, 7홉의 경우에는 지연시간이 길어지게 될 수 있다. 이럴 경우 7홉이 소요되는 패킷은 허용지연시간을 초과하여 목적지 노드에 도착할 확률이 높아지게 된다. 따라서 동일한 우선순위의 메시지일지라도 목적지까지 소요되는 홉 수에 따라 자원선점 경쟁방식의 차별화가 필요하다.

본 절에서는 동일한 우선순위의 메시지들이 전송될 경우, QoS 지원을 위하여 허용지연시간 내에 보다 많은 메시지가 전송될 수 있도록 하는 다중 홉 백오프 기법을 제안한다. 메시지가 소스 노드로부터 목적지 노드까지 도착해야 하는 허용지연시간을 P_i 로 가정하며, 허용지연시간을 바탕으로 한 홉에서 지연될 수 있는 시간을 평균 홉 지연 시간 H_i 라 가정한다. 먼저 메시지 우선순위에 따라 경쟁 윈도우(Contention Window) 영역을 m 개의 구간으로 구분한다. 각각의 우선순위의 경쟁 윈도우 영역 내에서 전술 네트워크내 최대 홉 수 n 홉을 가정하여, n 개의 구간으로 영역을 구분한다. 제안된 백오프 기법은 먼저 패킷의 우선순위를 확인하여 백오프 값이 해당 우선순위에 해당하는 경쟁 윈도우 영역 안에서 결정된다. 다음으로 목적지 노드까지의 홉수를 확인하여 해당되는 영역을 선택하게 된다. 여러 개의 플로우가 동시에 발생할 경우 특정노드에서 우선순위와 목적지 노드까지 홉수가 동일한 패킷들이 자원을 선점하기 위해 경쟁하게 된다. 이 때 패킷들의 충돌을 최소화하면서 허용지연시간을 최대한 만족하도록 수식 (5)를 적용한다. 해당 홉 수에 경쟁 윈도우 구간을 전반부와 후반부로 나누어 목적지 노드까지 도착해야 하는 평균 허용지연시간이 적게 남은 경우는 Fig. 5의 A영역에서 값이 설정된다. 수식 (5)에서 r 은 메시지가 현재노드에서 목적지노드까지 남아있는 홉의 개수이고, H_i 는 위에서 설명하였듯이 1홉에서의 평균지연시간이다. 예를 들어 목적지 노드까지 5홉이고 설정된 허용지연시간이 250ms인 경우 H_i 는 50ms가 된다. P_i 는 소스 노드에서 현재 노드까지 메시지가 전송되는데 소요된 시간이다. 만약 수식

(5)와 같이 앞으로 전송되어야 할 패킷의 계산된 허용 지연시간이 평균지연시간보다 작다면 최대한 빨리 전송되도록 A영역에서 백오프 값이 설정된다.

$$\frac{P_d - P_t}{r} < H_t \quad (5)$$

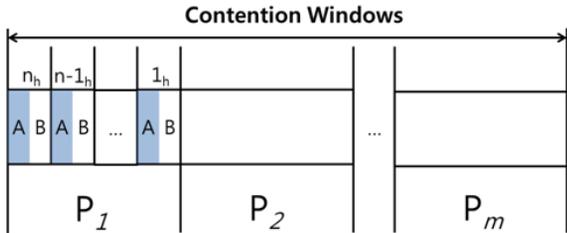


Fig. 5. 전술 메시지의 다중 홉 전송에 따른 백오프 구간 설정

4. 성능 분석

가. 수학적 분석

이번 장에서는 먼저 수식적인 계산을 통하여 IEEE 802.11과 제안 기법간의 종단간 지연시간을 이론적으로 비교하도록 하겠다.

먼저 두 기법은 다중 채널과 다중 인터페이스에서 최소 3홉 내에는 모두 직교(Orthogonal) 채널이 보장되어, Intra Interference는 없는 상황을 가정하였다. 즉, 3개의 채널과 인터페이스를 사용하며 통신상의 예러가 없고 전파 지연이 없는 환경을 가정한다. 또한 종단간 지연시간은 소스 노드로부터 패킷이 송신되어 목적지 노드에 수신될 때까지 소요된 시간으로 정의한다.

R은 링크의 데이터 전송 속도(bits/sec), D는 종단간 지연시간 그리고 C는 홉 카운트를 나타낸다. 수식 (6)은 D 노드가 표준 IEEE 802.11 MAC 사용할 시에 발생하는 종단간 지연시간의 계산식이다.

$$D_{conv} = C \times (Trts + Tcts + Tdata + 2 \times SIFS + backoff) \quad (6)$$

Trts, Tcts, Tdata and Tack은 PLCP(Physical Layer Convergence Procedure) 헤더를 포함한 각각의 RTS, CTS, DATA 그리고 ACK의 시간을 의미한다. PLCP 헤더는 34bytes이며, RTS는 20bytes 그리고 CTS와 ACK

은 14bytes로 이루어져있다^[8]. 수식 계산에서 데이터 전송 속도는 2Mbps, SIFS는 10us 그리고 백오프(Back-off) 슬롯 타임은 20us이고 백오프 슬롯의 개수는 64개로 가정하였다. 802.11 MAC과 비교를 위한 환경 설정은 선형 토폴로지 환경에서 3개 채널을 이용, 채널간섭이 없고 충돌이 발생하지 않는 상황으로 백오프 슬롯구간은 증가하지 않고 많은 수의 패킷이 전송될 경우 랜덤한 수의 평균값인 중간 값 32로 백오프 소요시간을 계산하였다. 제안 기법의 종단간 지연시간은 수식 (7)과 수식 (8)로 알 수 있다.

종단간 지연시간은 목적지까지 거쳐 가는 홉의 개수에 따라 유동적으로 변화한다. Fig. 6은 데이터 크기가 512bytes일 경우의 결과를 수식적으로 계산한 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 홉의 개수가 증가한다면 그에 따른 종단간 지연시간도 비례하게 증가한다. 또한, 미리 RTS와 CTS 프레임을 전송하여 예약하는 제안 기법과 다르게 IEEE 802.11은 매번 데이터 전송을 원할 때마다 경쟁을 통한 전송을 시도하기에 두 기법간의 종단간 지연시간 또한 홉 개수의 증가함에 따라 격차가 커지는 것을 알 수 있다.

$$D_{prop} = (T_{modifiedrts} + T_{cts} + T_{data} + 2 \times SIFS + backoff) + (C - 1) \times (T_{data} + 2 \times SIFS), \quad T_{data} > T_{modifiedrts} + T_{cts} + SIFS \quad (7)$$

$$D_{prop} = C \times (T_{modifiedrts} + backoff) + 2 \times SIFS + (C - 1) \times T_{data}, \quad T_{data} \leq T_{modifiedrts} + T_{cts} + SIFS, \quad C \geq 2 \quad (8)$$

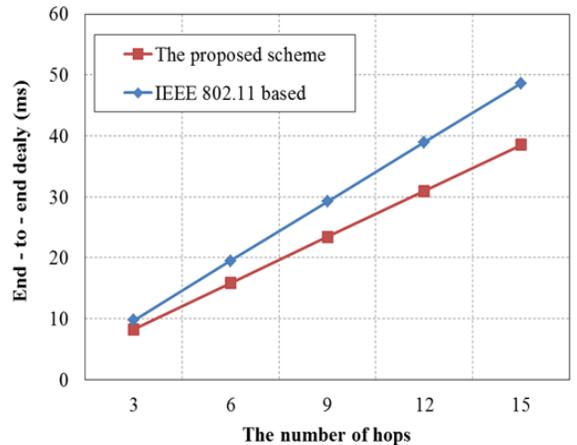


Fig. 6. 홉 수에 따른 지연시간의 수학적 분석

나. 시뮬레이션 실험 환경

본 논문에서는 멀티채널과 멀티인터페이스를 가지는 환경에서 제안 기법과 IEEE 802.11 기반 MAC 기법의 시뮬레이션 결과를 Qualnet 4.5^[9]를 사용하여 비교하였다. 두 기법 모두 세 개의 인터페이스와 세 개의 채널을 가지는 환경으로 실험하였으며, 데이터 전송 속도는 2Mbps로 설정하고 UDP의 CBR 트래픽으로 성능을 측정하였다. 패킷의 전송 간격은 10ms에서 100ms로 설정하였으며, 시뮬레이션 시간은 100초이고, 시뮬레이션 환경은 크게 선형 토폴로지와 격자형 토폴로지의 형태로 802.11 MAC과 동일한 Fairness 기능을 포함하여 실험하였다. 패킷의 우선순위는 네 가지로 나누고 한 개의 네트워크에서 최대 홉수는 15 홉으로 가정하였다. 각 우선순위에 경쟁 윈도우 영역은 64로 할당하였다. 아래의 실험 결과는 가장 높은 우선순위를 패킷을 적용했을 때의 결과이다. 사용된 매트릭(Metric)으로는 처리량(Throughput), 종단간 지연 시간(End-to-End Delay), 제어메시지 오버헤드(Control Packet Overhead) 그리고 패킷 성공 전달률(Successful Hit Ratio)로 총 네 가지를 측정하였다. 여기서 패킷 성공 전달률이란 각 패킷의 중요도에 따라 허용할 수 있는 지연 시간을 지정하고, 지정된 지연 시간 안에 패킷들이 최종 목적지 노드까지 도착한 비율을 측정하는 결과이다.

다. 모의실험 결과

1) 선형 토폴로지

먼저, 선형 토폴로지의 환경에서 하나의 패킷 플로우를 발생시켜 IEEE 802.11과 제안기법을 비교 실험하였다. Fig. 7은 소스부터 목적지까지의 홉의 개수를 3개에서 15개까지의 증가시키면서 종단간 지연시간을 측정하는 결과 그래프이다. 이 그래프에서 홉의 개수가 증가함에 따라 종단간 지연시간도 비례하여 증가함을 볼 수 있다. 제안 기법의 경우, 앞서 말한 바와 같이 예약을 통한 방식으로 RTS/CTS 경쟁의 지연시간을 줄이므로 홉의 개수가 증가함에 따라 IEEE 802.11 보다 더 좋은 성능 향상이 나타나는 것을 알 수 있다. 이 시뮬레이션 결과는 수학적 분석으로부터 나온 Fig. 6과 비슷한 결과가 보여짐을 알 수 있다. 전송구간이 15홉인 경우 제안기법의 종단간 지연시간은 IEEE 802.11의 지연시간과 비교하여 약 16%가 감소하였다.

Fig. 8은 홉의 개수가 3, 6, 9일 때 허용할 수 있는

종단간 지연시간을 10, 20, 30ms로 설정하고 최종 목적지 노드까지 성공적으로 도착한 패킷의 비율인 패킷성공 전달률을 측정한 그래프이다. 제안기법의 경우 대부분의 패킷이 정해진 시간 안에 들어왔지만, IEEE 802.11의 경우에는 평균 약 61%정도의 패킷만이 지정된 시간 안에 도착하였음을 볼 수 있다.

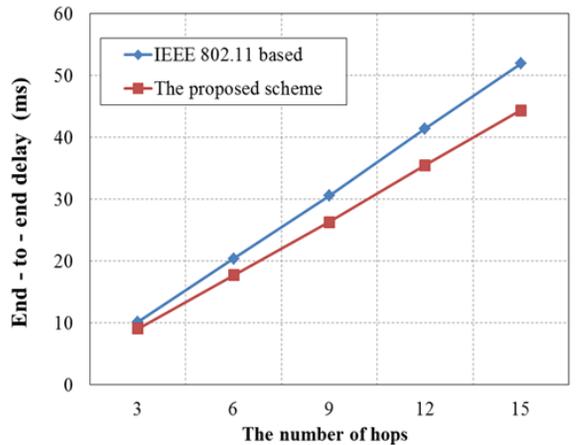


Fig. 7. 홉 수에 따른 지연시간 측정결과

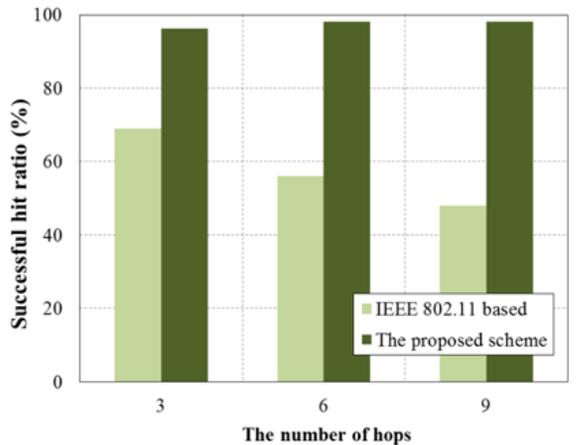


Fig. 8. 홉 수에 따른 패킷 성공 전달률

Fig. 3에서와 같이 제안 기법에서 사용되는 MH-RTS의 경우 추가 정보들로 인하여 기존의 RTS 프레임보다 55% 더 증가하였다. 그러나 Fig. 9에서 보는 바와 같이 RTS와 CTS, ACK 프레임을 모두 합하여 오버헤드 크기를 비교한 경우 평균 약 13% 정도 제안기법이 증가하였다.

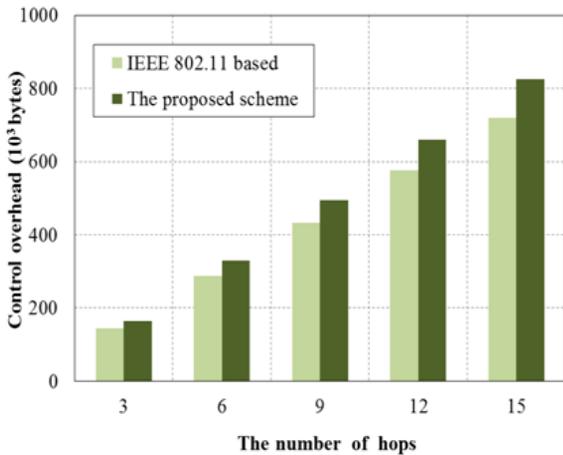


Fig. 9. 홉 수에 따른 제어 메시지 오버헤드

2) 격자형 토폴로지

여러 개의 플로우(Flow)가 네트워크에 발생할 경우 제안기법과의 성능을 비교하기 위해 격자형 토폴로지를 구성하고 종단간 지연시간, 처리량 그리고 패킷 성공 전달률을 측정하였다. 노드간의 간격은 200m로 총 36개의 노드들을 6×6 격자형으로 배치하고, 패킷 크기는 512byte로 설정하였다. 소스 노드에서 목적지 노드까지 각 플로우들의 평균 홉수는 5홉으로 설정되었다. 플로우 개수는 2개에서 5개로 증가시키면서 결과를 측정하였다.

Fig. 10은 소스 노드와 목적지 노드의 개수를 2개의 쌍에서 5개 쌍으로 증가시키면서 플로우들이 교차되는 노드에서 채널 선점을 위해 경쟁하는 환경에서 제안기법과 일반적인 IEEE 802.11 MAC을 비교하여 평균지연시간을 측정한 결과이다. 플로우 개수가 증가할수록 IEEE 802.11기반 기법과 제안기법 모두 지연시간의 증가폭이 커지는 것을 알 수 있는데, 그 이유는 여러 개의 플로우가 상호 교차되면서 자원점유를 위해 서로 경쟁하고 대기하는 시간이 증가되었기 때문이다. 제안기법의 경우 MH-RTS를 이용하여 다중 홉 예약을 하더라도 자원점유를 위해 경쟁하고 대기해야 하는 경우가 발생되더라도 이전 홉들까지 데이터가 전송하게 된다. 이후, ACK를 수신시 다른 플로우의 패킷들이 전송이 가능하도록 채널이 유희상태가 되어 다른 패킷들이 오랫동안 대기하는 것을 방지한다. 결과적으로 멀티채널 환경 하에 가용한 채널이 존재한다면 MH-RTS를 미리 전송하여 매 홉마다 RTS, CTS 전송을 위해 대기하는 시간을 단축하여 기

존 방식보다 평균지연시간이 약 18% 향상된 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 격자형 토폴로지에서의 처리량을 나타낸 것으로 플로우의 개수가 증가할수록 네트워크에서 전송되는 데이터양이 증가하므로 처리량이 증가되는 것을 확인 할 수 있다. 제안 기법이 기존의 IEEE 802.11 방식보다 처리량이 약간 더 높은데, 그 이유는 다중 홉 예약을 적용하여 패킷의 지연시간이 감소되고, 지연시간 감소에 따라 패킷들 간의 간섭이 줄어들어 기존방식보다 더 많은 패킷을 처리할 수 있는 환경이 제공되었기 때문이다.

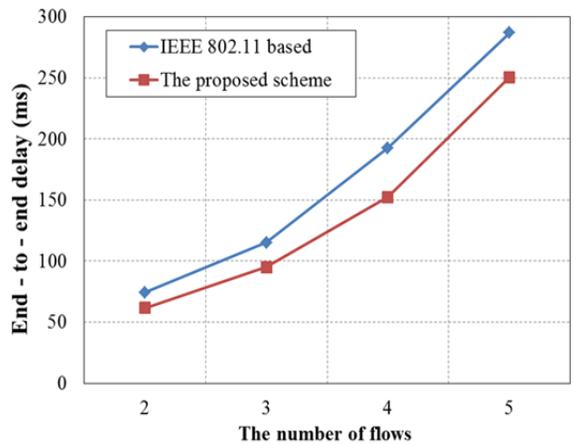


Fig. 10. 격자형 토폴로지서 패킷 흐름 수에 따른 지연시간 측정

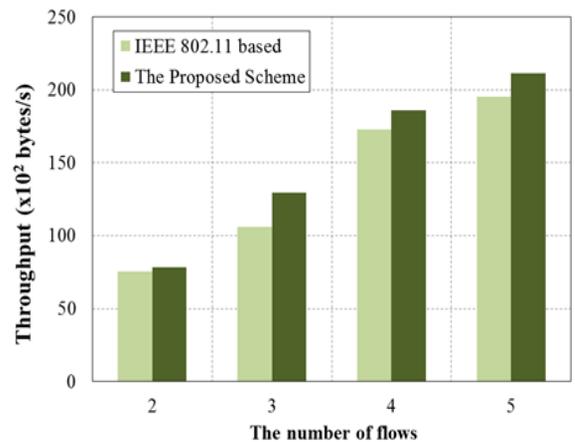


Fig. 11. 격자형 토폴로지서 패킷 플로우 개수에 따른 처리량

Fig. 12은 목적지 노드까지 허용된 지연시간에 도착한 패킷들에 대한 성공적인 패킷 전달률을 나타낸 그래프이다. 패킷의 허용지연시간은 Table 2에서 설명된 것과 같이 250ms으로 설정하였다. 그 시간 안에 목적지노드에 도착하면 성공, 그 이후에 도착하면 실패로 처리하였다. 2개에서 4개의 패킷 플로우를 생성하여 전송할 때까지는 제안기법이나 IEEE 802.11 기반의 방식이나 거의 모든 패킷들이 250ms안에 성공적으로 도착하였다. 그러나 5개의 플로우가 발생하였을 경우에는 각 플로우의 충돌이 많아져 데이터를 전송하지 못하고 대기하는 시간이 증가되어 허용지연시간 안에 도착하지 못하는 경우가 증가되는 것을 알 수 있다. 이때 제안기법의 경우 약 5% 패킷이 실패율을 보였지만 IEEE 802.11 MAC의 경우에는 약 34% 정도가 허용지연시간을 초과하게 되는 것을 알 수 있다.

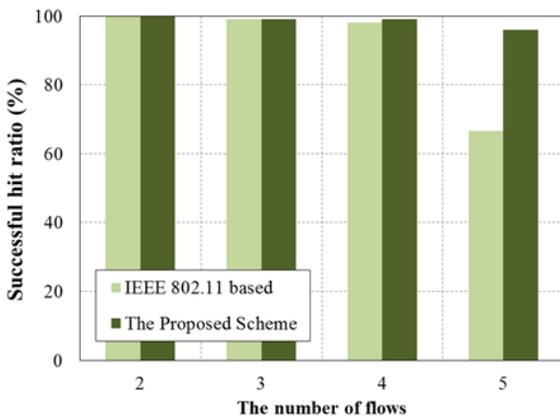


Fig. 12. 격자형 토폴로지에서 패킷의 성공적 전달률

5. 결론

급변하는 군 전송환경에서 다양한 종류의 전송 메시지가 작전요구를 충족하도록 정해진 시간 안에 목적지 노드에 전달되도록 QoS를 보장하는 것은 매우 중요하다. 본 논문은 다중 인터페이스와 다중 채널의 노드를 사용하는 전송 애드혹 네트워크에서 종단간의 지연시간을 감소하고, 백오프 조절을 통하여 전송메시지의 QoS를 향상시키는 IEEE 802.11 기반의 다중 홉 MAC 프로토콜을 제안하였다. 제안된 기법의 MH-RTS 프레임은 군의 정찰병과 같은 역할을 수행하여 다중 홉으로 미리 보내져 자원을 예약해 데이터 프레임 즉,

전송 메시지가 최소의 지연시간으로 전송되는 것을 가능하게 하였고 여러 노드들이 메시지를 생성하여 동시에 전송할 경우 우선순위와 홉 수, 그리고 허용지연시간들을 고려하여 최대한 많은 전송메시지들이 작전 요구사항에 부합되는 설정된 허용시간을 만족하여 QoS를 보장받도록 하였다.

References

- [1] P. Marshall, "DARPA Progress Towards Affordable, Dense, and Content focused Tactical Edge Networks", in proc. IEEE MILCOM 2008.
- [2] S. Xu T. Saadawi, "Does the IEEE 802. 11 MAC Protocol Work Well in Multihop Wireless Ad Hoc Networks?", IEEE Communication Magazine, June, 2001.
- [3] A. Acharya, A. Misra, and S. Bansal, "A Label-switching Packet Forwarding Architecture for Multihop Wireless LANs", in proc. WoWMoM 2002.
- [4] R. Ramanathan, F. Tchakountio, "Ultra Low Latency MANETs", BBN Technical Memorandum No. TM-2023, available at <http://www.ir.bbn.com/ramanath/pdf/ull-techreport.pdf>
- [5] R. Ramanathan, F. Tchakountio, "Channel Access Over Path Segments for Ultra Low Latency MANETs", in proc. MILCOM 2007.
- [6] L. Bononi, M. D. Felice, A. Molinaro, S. Pizzi, "A Cross-layer Architecture for Efficient Multi Hop Communication in Multi-channel Multi-radio Wireless Mesh Networks", in proc. Sensor, Mesh and Ad Hoc Communication and Networks Workshop 2009.
- [7] M. S. Cast, 802.11 Wireless Network : The Definitive Guide, O'Reilly and Associates, 1st Edition, 2002.
- [8] B. H. Walke, S. Mangold, L. Berlemann, IEEE 802 Wireless Systems, John Wiley & Sons, Ltd, 2006.
- [9] QualNet Simulator Version 4.5, Scalable Network Technologies, www.scalable-networks.com
- [10] B. G. Jeffrey, W. Foley, "WIN-T Increasing the Power of Battlefield Communications", Army Communicator, Summer 2008, Vol. 33(3).
- [11] M. D. Street and F. Szczucki, "Wireless Communi-

cations Architecture(Land) : Scenarios, Requirements and Operational View”, NATO C3 Agency, Tech. Note 1246, Dec. 2006.

- [12] C4ISR IPT, “C4ISR Network Assumptions White Paper in Support of Study Plan for the Future Combat System(FCS) Communications Network

Analysis in Support of the FCS System Development and Demonstration(SDD) Phase”, 2005.

- [13] Youn-Chul Cho, Sun-Joong Yoon and Young-Bae Ko, “Modifying the IEEE 802.11 MAC Protocol for Multi-hop Reservation in MIMC Tactical Ad Hoc Networks”, AINA Workshops, Mar. 2011.