

무선 네트워크에서 QoS 보장을 위한 MAC 향상 기법

이동건[†], 김병훈^{**}, 탁성우^{***}

요 약

인프라스트럭처(infrastructure) 방식 기반의 무선 네트워크에서는 모든 무선 단말간의 통신이 무선 AP(Access Point)를 통하여 이루어진다. 그러나 무선 단말이 음영지역으로 이동하면 무선 단말과 무선 AP 간의 통신이 단절되고, 무선 네트워크 내에 존재하는 다른 무선 단말과의 통신도 단절되는 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해서는 기반 통신 시설이 없이도 무선 단말간의 끊김없는 통신을 제공할 수 있는 애드혹(ad hoc) 기반의 무선 네트워크 환경을 고려해야 한다. 이에 본 논문에서는 애드혹 기반의 무선 네트워크 환경에서 홉 간 다중 경로(Hop-by-Hop Multipath)에 전달되는 MAC (Medium Access Control) 프레임의 마감시한을 보장하여 응용 서비스의 품질을 보장할 수 있는 DNSQ-MAC (Dynamic Network State aware Quality of service - Medium Access Control) 기법을 제안하였다. DNSQ-MAC 기법은 애드혹 기반의 무선 네트워크에서 동적으로 변하는 네트워크 상태에 적응하여 서비스 품질을 향상시킨다. Qualnet을 이용한 모의실험을 통해 제안된 기법의 성능을 평가한 결과, DNSQ-MAC 기법은 홉 간 다중 경로에서 전달되는 MAC 프레임의 마감시한을 보장하고, MAC 계층의 상위 계층인 네트워크 계층에서 동작되는 다양한 라우팅 프로토콜 및 패킷 스케줄러에서도 향상된 서비스 품질을 제공하였다.

A MAC Enhancement Technique for Quality of Service Guarantee in Wireless Local Area Networks

Donggeon Lee[†], Byounghoon Kim^{**}, Sungwoo Tak^{***}

ABSTRACT

In an infrastructure-based wireless network, an access point is used for all communications among mobile devices. However, when a mobile device moves into a dead zone, a connectivity disruption between the mobile device and the access point occurs. Such connectivity disruption consequently leads to another connectivity disruption between the mobile device moving toward the dead zone and other wireless-enabled devices located within the area of the infrastructure-based wireless network. To cope with the connectivity disruption in the infrastructure-based wireless network, the ad hoc network that dynamically forms a network without any preexisting communication infrastructure needs to be set up to provide seamless connections among mobile devices. In this paper, we propose the DNSQ-MAC (Dynamic Network State aware QoS - Medium Access Control) technique that meets the deadlines of MAC frames forwarded over hop-by-hop multipaths and guarantees the QoS performance of an ad hoc-based wireless network. Mobile devices incorporating the DNSQ-MAC technique are capable of adjusting to the new dynamic network status in order to enhance the QoS performance in the ad hoc-based wireless network. A case study which exploits the Qualnet simulator shows that the proposed DNSQ-MAC technique can guarantee the deadlines of MAC frames forwarded over hop-by-hop multipaths and enhance the QoS performance of various routing protocols and packet schedulers running on the network layer above the MAC layer.

Key words: QoS Provisioning(Quality of Service 보장), MAC(Medium Access Control), Wireless Local Area Networks(무선 네트워크)

※ 교신저자(Corresponding Author) : 탁성우, 주소 : 부산광역시 금정구 장전동 산 30(607-735), 전화 : 051)510-2387, FAX : 051)515-2208, E-mail : swtak@pusan.ac.kr
접수일 : 2008년 5월 28일, 완료일 : 2008년 8월 27일

[†] 준회원, 부산대학교 컴퓨터공학과 박사과정

(E-mail : send234h@naver.com)

^{**} 준회원, 부산대학교 컴퓨터공학과 석사과정

(E-mail : bhkim81@gmail.com)

^{***} 종신회원, 부산대학교 정보컴퓨터공학부 부교수

1. 서 론

최근의 무선 단말은 휴대가 가능한 무선 멀티미디어 단말로 발전하고 있다. 이에 무선 네트워크에서는 이러한 무선 단말이 요구하는 멀티미디어 응용 서비스의 품질을 제공할 수 있어야 한다. 과거에는 유선 네트워크 환경만을 고려하여 응용 서비스 별로 네트워크의 대역폭을 미리 예약하는 방법을 통해 응용 서비스의 품질을 제공하였다. 그러나 최근에는 무선 네트워크 환경과 응용 서비스의 실시간성을 고려한 기법이 연구되고 있다. 특히 IEEE 802.11 MAC을 기반으로 응용 서비스별로 무선 매체 접근을 차별화하거나, 데이터 프레임의 우선순위에 따라 스케줄링하여 전송하는 방식이 많이 연구되었다.

현재 보편화된 IEEE 802.11 기반의 무선 네트워크는 액세스포인트(Access Point)가 각 무선 단말간의 통신 연결을 제공하는 인프라스트럭처(Infrastructure) 방식으로 동작한다. 그러나 인프라스트럭처 방식의 무선 네트워크에서는 무선 단말이 액세스포인트의 전파 도달 범위 밖으로 이동하거나 건물 구조 및 장애물에 의해 액세스포인트와 통신이 불가능한 음영지역으로 이동하면 다른 무선 단말과의 통신도 단절되는 문제가 발생한다.

일반적으로 무선 단말의 이동성에 따른 끊임없는 서비스는 종단 간 전송(End-to-End Delivery)을 담당하는 네트워크 계층에서 제공되며, 이와 관련된 프로토콜로는 AODV(Ad hoc On-demand Distance Vector)와 DSR(Dynamic Source Routing)이 있다 [1-2]. 그리고 응용 서비스가 요구하는 QoS(Quality of Service)의 보장은 일반적으로 네트워크 계층 위에서 동작하면서 패킷의 중요도에 따라 패킷 전달 순서를 차별화하는 패킷 스케줄러를 사용하여 제공한다.

채널의 상태가 일정하게 유지되는 유선 통신망에서는 네트워크 계층에서 QoS를 보장하는 기법이 잘 적용될 수 있다. 그러나 SINR(Signal-to-Interference plus Noise-Ratio)값이 계속적으로 변하고 무선 단말이 이동 가능한 일반적인 무선 네트워크 환경에서는 무선 채널의 용량이 시공간적으로 계속 변하기 때문에 네트워크 계층에서 동작되는 QoS 보장 기법의 효율적인 성능을 기대하기가 어렵다. 특히, 실시간 처리를 요구하는 멀티미디어 서비스의 경우

에는 패킷의 마감시한을 보장해야 하는데, 네트워크 계층에서 동작되는 패킷 스케줄러에 의해 마감시한 내에 패킷이 전달되더라도 MAC 계층에서 매체 접근이 지연되는 경우 네트워크 계층에서 전달된 패킷의 마감시한이 초과된다. 이는 통신 계층의 구조상 MAC 계층과 네트워크 계층 간의 관계가 서로 독립적이므로 네트워크 계층에서 응용 서비스의 중요도가 높은 패킷을 우선적으로 전달하더라도 MAC 계층에서 서비스의 중요도 및 패킷의 마감시한에 따라 매체 접근을 차별화하는 기법을 제공하지 않기 때문이다.

이에 본 논문에서는 에드혹 기반의 무선 네트워크에서 다중 홉 간 전송경로에 전달되는 MAC 프레임의 마감시한을 보장하여 응용 서비스의 QoS를 MAC 계층에서 제공할 수 있는 DNSQ-MAC(Dynamic Network State aware QoS - Medium Access Control) 기법을 제안하였다. 제안한 DNSQ-MAC 기법은 기존의 IEEE 802.11 MAC과의 호환성을 유지함과 동시에 네트워크의 상태를 고려한 차별화된 매체 접근 기법을 제공한다. 또한, 제안한 DNSQ-MAC 기법은 IEEE 802.11 MAC에서 수행되는 백오프(Backoff) 및 재전송 상황을 반영하여 MAC 프레임의 마감시한을 보장할 수 있는 MAC 프레임의 전송 시점을 예측하고, 이에 기반을 두는 스케줄링 방법을 제공한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 QoS를 보장하는 무선 MAC 향상 기법에 대한 기존 연구를 분석하였으며, 3장에서는 MAC 계층에서 QoS를 보장하는 DNSQ-MAC 기법을 설명하였다. 4장에서는 제안한 DNSQ-MAC 기법의 성능을 분석하였으며, 마지막으로 5장에서는 결론을 기술하였다.

2. 관련 연구

에드혹 기반의 무선 네트워크에서 QoS를 보장하는 무선 MAC 향상 기법에 대한 연구는 다음과 같이 두 가지로 분류될 수 있다. 먼저, 중요도가 높은 MAC 프레임을 보내고자 하는 무선 단말이 우선적으로 무선 채널을 선점할 수 있도록 사용되는 백오프 혹은 IF(S(Inter-Frame Space) 기반의 매체 접근 제어 기법이 있다. 이러한 매체 접근 제어 기법은 각각의 무선 단말이 공유하는 무선 채널에 대한 선점만을 고려

한다. 그리고 다양한 응용 서비스로부터 생성된 데이터를 우선 순위도에 따라 MAC 계층에 우선적으로 전달하는 MAC 프레임 스케줄링 기법이 있다.

QoS를 보장하기 위한 무선 매체 접근 제어와 관련된 기존의 연구를 살펴보면 다음과 같다. 무선 매체 접근을 제어하는 방법으로는 각 단말이 임의로 매체를 접근하는 방식(Random Access)과 액세스포인트와 같은 중앙 관리 장치가 각 단말에게 차례로 매체 접근에 대한 유무를 검사 및 허가하는 폴링 방식(Polling Access)이 있다.

먼저 임의 접근 방식에 대하여 살펴보면 다음과 같다. IEEE 802.11e의 기본 매체 접근 제어 기법인 EDCF(Enhance Distributed Coordinated Function) 방식은 응용 서비스의 데이터 프레임의 QoS 요구 사항에 따라 4개의 우선순위를 가지는 차별화된 MAC 프레임으로 분류하고 차별화된 각각의 MAC 프레임에 서로 다른 IFS값과 최대 지연 가능한 백오프 값을 적용하여 우선순위가 높은 데이터 프레임이 먼저 무선 매체에 접근할 수 있는 확률을 높인다. 그러나 우선순위가 높은 MAC 프레임이 우선순위가 낮은 MAC 프레임보다 먼저 매체를 선점할 수 있는 확률이 높다고 하여 우선적인 매체 접근을 항상 보장하는 것은 아니다. 따라서 우선순위가 낮은 프레임이 매체를 먼저 선점하면 우선순위가 높은 MAC 프레임의 전송이 지연될 수 있다. 무선 채널의 품질 저하나 현재의 MAC 프레임의 재전송 문제로 인하여 현재 혹은 다음 MAC 프레임의 전송 지연 상황이 발생하여 응용 서비스가 요구하는 MAC 프레임의 도착 마감시한을 보장하기가 어렵다[3].

DFS(Distributed Fair Scheduling)에서는 기존의 공평성 스케줄링인 SCFQ(Self-Clocked Fair Queueing)를 사용하여 각 무선 단말의 현재 백오프 값을 기반으로 트래픽 흐름의 가중치를 독립적으로 계산하고, 계산된 가중치에 따라 무선 채널의 대역폭 할당을 수행한다[4]. DWFQ(Distributed Weighted Fair Queueing)에서는 MAC 경합 윈도우(Contention Window)의 최소값을 가진 무선 단말이 공유 무선 채널에 더 빨리 접근할 수 있다는 현상에 기인하여, 그 무선 단말이 먼저 무선 채널을 선점할 수 있도록 전송되는 트래픽 흐름(Traffic Flow)의 가중치를 더 높게 조절한다[5-6]. 그러나 DFS와 DWFQ는 트래픽 흐름의 가중치 부여에 대한 공평성에만 관심을

두기 때문에 트래픽 흐름의 구성 요소인 개별 패킷에 대한 QoS를 보장하지 못한다.

P-DCF(Persistent factor Distributed Coordination Function)는 트래픽 종류에 따라 영속성 지수(Persistent Factor) P값을 지정하고 백오프 과정의 일정 시간 간격마다 발생하는 확률적 균등분포난수의 값이 P값보다 큰 경우에 백오프를 종료시켜 무선 단말이 무선 매체의 접근을 시도할 수 있게 한다[7]. DRRR(Distributed Deficit Round Robin)은 트래픽 종류에 따라 IFS값을 차별화하고 차별화된 IFS값에 의하여 무선 매체 접근의 차별화를 제공하는 기법이다[8]. P-DCF와 DRRR에서 제공하는 무선 매체 접근 기법은 동적으로 변하는 네트워크 상황 및 다른 무선 단말의 매체 접근 시도를 고려하지 않기 때문에 응용 서비스에게 QoS를 제공하기가 어렵다.

한편, 응용 서비스의 QoS를 보장하기 위해서는 다양한 응용 서비스로부터 생성된 데이터가 우선 순위도에 따라 MAC 계층에 먼저 전달되는 것을 보장하는 스케줄링 기법도 필요하다. 이와 관련된 기존의 연구를 살펴보면 다음과 같다. MMACA/PR(Modified Multiple Access Collision Avoidance / Piggyback Reservation)[9]과 MMMP(Multi-rate Multi-hop QoS-aware MAC Protocol)[10], 그리고 DPS(Distributed Priority Scheduling)[11]는 애드혹 네트워크 환경을 고려한 QoS 향상 기법으로, MAC 프레임 내에 트래픽 정보를 포함하여 송수신 한 후에, 송수신된 트래픽 정보를 기반으로 MAC 프레임을 스케줄링 한다. 송신 단말 A에서 보내고자 하는 실시간 데이터 프레임의 도착 간격 시간(Inter-arrival Time) 및 데이터 프레임의 길이와 같은 실시간 속성 정보를 RTS(Ready-To-Send) 프레임에 삽입하여 전송하면, 해당 RTS 프레임을 감지한 단일 홉 주변의 이웃 무선 단말들은 송신 단말 A로부터 전송되는 실시간 데이터 프레임의 속성을 기반으로 하여 자신들의 무선 매체 접근 시간에 대한 스케줄링을 재계산한다. 그리고 RTS 프레임의 목적지 단말 B는 송신 단말 A가 요구하는 실시간 데이터 프레임의 속성에 맞게 해당 데이터 프레임을 처리할 수 있으면 이에 대한 응답으로 CTS(Clear-To-Send) 프레임을 보내고 이를 수신한 단말 A는 실시간 데이터 프레임을 전송한다. 그러나 만약 모든 단말이 실시간 데이터 프레임에 대한 전송을 시도하는 경우에는, RTS

프레임을 먼저 보낸 단말이 항상 무선 채널을 점유할 수 있다. 따라서 다른 단말에서 보내고자 하는 실시간 데이터 프레임의 서비스 마감시한이 초과되거나 비실시간 패킷에 대한 전송을 보장할 수 없다는 문제점이 있다.

에드후 네트워크 환경을 고려한 QMA(QoS-based Multiple Access)[12]와 RT-WLAN(Real-Time WLAN)[13]에서는 마감시한이 짧은 MAC 프레임들이 먼저 전송될 수 있도록 높은 우선순위를 부여하여 스케줄링을 하는 EDF(Earliest Deadline First) 기법을 사용한다. 그러나 QMA 및 RT-WLAN 기법에서는 마감시한에 가까운 MAC 프레임이 먼저 전송될 확률이 높기 때문에 무선 채널이 불안정한 경우에는 전송의 실패로 인한 재전송이 발생한다. 이로 인해 실시간 MAC 프레임이 요구하는 마감시한을 초과하여 해당 응용 서비스의 QoS를 보장 못한다.

분석된 기존의 관련 연구를 기반으로 하여 본 논문에서 접근하고자 하는 연구 방향은 다음과 같다. 먼저, 각각의 무선 단말이 공유하는 무선 채널에 대한 접근을 효율적으로 제어하여 무선 네트워크의 전체적인 상황에 따라 QoS를 보장할 수 있는 무선 매체 접근 제어 기법을 제안하고자 한다. 그리고 각 무선 단말에서 동작하는 응용 서비스의 QoS 요구 사항을 고려하여, 응용 서비스의 우선순위 및 마감시한에 따라 데이터 프레임을 MAC 계층에 우선적으로 전달하고자 한다. 그리고 에드후 기반의 무선 네트워크에서 다중 홉 간 전송경로에 전달되는 MAC 프레임의 전달 마감시한을 보장할 수 있어야 한다. 또한, IEEE 802.11 MAC과의 호환성을 유지함과 동시에 동적으로 변하는 네트워크의 상태를 고려하는 QoS 보장도 고려해야 한다. 이를 위해서는 IEEE 802.11 MAC에서 수행되는 백오프 및 재전송 상황을 반영하여 MAC 프레임의 마감시한뿐만 아니라 MAC 프레임의 전송 시점에 대한 스케줄링 방법도 고려해야 한다. 다음 장에서는 이러한 QoS 요구 사항을 반영한 DNSQ-MAC의 핵심 기법에 대하여 기술하였다.

3. DNSQ-MAC(Dynamic Network State aware QoS - Medium Access Control) 기법

그림 1은 본 논문에서 제안한 DNSQ-MAC 기법

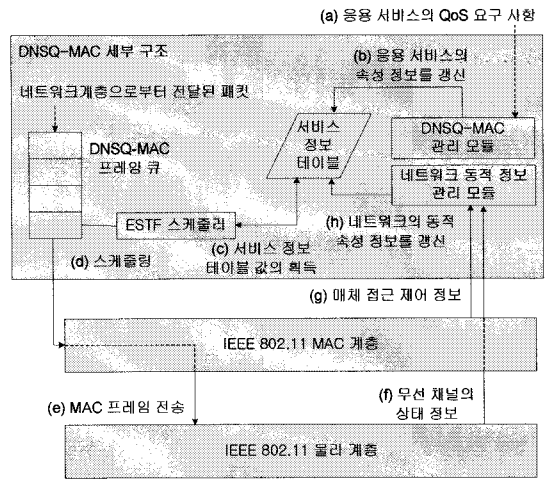


그림 1. DNSQ-MAC의 구조 및 처리 과정

의 전체 동작 과정을 보여준다. 그림 1에서 보는 바와 같이 DNSQ-MAC 기법은 MAC 계층과 네트워크 계층 사이에서 동작하는 2.5 계층 기반의 QoS 향상 기법으로써, 응용 서비스가 요구하는 QoS 보장을 위하여 하위 MAC 계층으로부터 획득한 네트워크의 상태 정보에 동적으로 적용이 가능하도록 설계되었다. 본 논문에서는 무선 네트워크에서 가장 많이 사용되고 있는 IEEE 802.11 MAC 계층을 기반으로 하여 DNSQ-MAC 기법을 설계하였다.

DNSQ-MAC은 DNSQ-MAC 관리 모듈과 네트워크 동적 정보 관리 모듈, 그리고 ESTF (Earliest Start-time of Transmission First) 스케줄러로 구성된다. DNSQ-MAC 관리 모듈은 응용 서비스의 속성에 의하여 요구되는 다중 홉 간 전송 지연, 그리고 데이터 프레임의 생성 주기와 크기에 대한 QoS 요구 사항을 응용 계층으로부터 획득한 후에(그림 1-(a)), 해당 응용 서비스의 수락 유무를 결정하고 획득한 정보를 서비스 정보 테이블에 저장한다(그림 1-(b)). 서비스 정보 테이블에는 응용 서비스의 속성 정보와 동적으로 변하는 네트워크 상태 정보가 저장되고 관리된다. ESTF 스케줄러는 앞에서 기술한 서비스 정보 테이블의 값을 기반으로 하여 동적으로 변하는 네트워크 상태에 적합하도록 데이터 프레임의 마감시한을 재계산하여 응용 서비스에서 요구하는 QoS를 보장하고자 한다(그림 1-(c)). 그리고 ESTF 스케줄러는 응용 서비스가 요구하는 QoS 보장을 위하여 데이터 프레임의 마감시한에 따라 데이터 프레임의

MAC 계층에 최우선적으로 전달이 필요한 데이터 프레임은 먼저 선출하여 하위 IEEE 802.11 MAC 계층에 전달한다(그림 1-(d)). 데이터 프레임을 전달받은 IEEE 802.11 MAC 계층은 이를 MAC 프레임으로 변환한 후에 IEEE 802.11 물리 계층으로 전달한다(그림 1-(e)). 네트워크 동적 정보 관리 모듈은 MAC 프레임의 전송시점에서 획득한 무선 채널의 상태 정보와 매체 접근 제어 정보를 하위 IEEE 802.11 물리 및 MAC 계층으로부터 획득한 후에(그림 1-(f), 그림 1-(g)) 이러한 정보를 기반으로 하여 서비스 정보 테이블의 내용을 갱신한다(그림 1-(h)).

표 1은 앞에서 기술한 서비스 정보 테이블의 구성 요소를 보여준다. 응용 서비스의 속성 정보를 먼저 살펴보면 다음과 같다. 응용 계층에서 동작되는 개별 서비스들을 구별하기 위하여 서비스 ID(SID: Service Identification)에 대한 정보가 관리 및 유지된다. 그리고 응용 서비스가 생성하는 데이터 프레임의 생성주기(FP: Frame Period)와 데이터 프레임의 최대 크기(FL: maximum Frame Length) 및 생성된 프레임의 소유권(FO: Frame Ownership)에 대한 정보가 관리 및 유지된다. 한편, 동적으로 변하는 네트워크의 상태 정보를 살펴보면 다음과 같다. 다중 홉 기반의 종단 간 전송지연(TD: multi-hop Transmission Delay between source and destination) 및 단일 홉 기반의 전송 지연(LD: one-hop Local Delay)에 대한 정보가 관리 및 유지된다. IEEE 802.11 MAC 계층에서 수행되는 백오프 및 MAC 프레임의 재전송 상황을 반영하기 위해 프레임 재전송 횟수(FRC: Frame Retransmission Count)에 대한 정보가 관리 및 유지된다. 또한 IEEE 802.11 MAC 계층과 물리 계층으로부터 획득한 무선 네트워크의 채널 품질(CQ: Channel Quality)에 대한 정보가 관리 및 유지된다.

서비스 정보 테이블은 새로운 서비스의 추가나 삭제, 패킷 전송으로 인한 서비스 정보 변경 등의 상태 변화를 반영한다. 네트워크 상태는 환경의 변화, 노

드의 이동 등에 의해 지속적으로 변화하며, 이러한 네트워크의 상태 정보를 동적으로 관리하기 위해 서비스 정보 테이블이 사용된다. 본 논문에서 제안한 DNSQ-MAC 항상 기법은 서비스 정보 테이블에서 유지되는 내용들을 기반으로 하여 각각의 무선 단말이 공유하고 있는 무선 네트워크에 대한 동적인 상태 정보를 효율적으로 반영하여 무선 네트워크의 전체 상황에 적용 가능한 QoS 보장을 제공하고자 한다. 해당 응용 서비스의 수락 유무에 대한 결정을 담당하는 DNSQ-MAC 관리 기법에 대하여 자세히 살펴보면 다음과 같다.

앞서 기술한 바와 같이 DNSQ-MAC 관리 모듈은 응용 서비스의 QoS 요구사항을 응용 계층으로부터 획득한 후에 해당 응용 서비스의 수락 여부를 결정하고, 수락이 결정되면 획득한 정보를 서비스 정보 테이블에 저장하는 역할을 한다. 서비스의 수락 여부 결정은 기존에 수행 중인 서비스의 QoS 제공을 보장 하면서, DNSQ-MAC 계층에서 최대한 많은 서비스를 제공할 수 있도록 한다. 본 논문에서는 우선순위 기반의 M/G/1 큐잉 이론을 사용하여 새로운 응용 서비스의 수락 여부를 결정하는 수학적 모델링 기법을 제안하였다. 큐잉 이론을 사용한 새로운 서비스의 처리 지연 시간이 서비스가 요구하는 전송 지연 시간 보다 작을 때, DNSQ-MAC은 새로운 응용 서비스에 대한 수락을 허용한다.

각 응용 서비스에서 생성된 데이터 프레임의 단위 시간당 도착율이 포와송 분포라고 가정하면 DNSQ-MAC의 프레임 큐에 들어오는 전체 트래픽의 단위 시간당 도착율도 포와송 분포를 따른다. 그러나 각 응용 서비스가 생성한 데이터 프레임의 크기가 서로 다르고 무선 네트워크 상태에 따라 각 프레임의 전송 시간이 다르기 때문에 서비스 처리율은 결정적 분포나 지수 분포를 따르지 않는다.

현재 S개의 응용 서비스가 무선 단말에서 수행 중이고, 개별 응용 서비스 s는 단위 시간당 데이터 프레임의 도착율 λ_s 와 데이터 프레임의 처리율 μ_s , 그리고

표 1. 서비스 정보 테이블의 구성

응용 서비스의 속성 정보				네트워크의 동적 상태 정보			
SID	FP	FL	FO	TD	LD	FRC	CQ
서비스 ID	프레임 생성 주기	프레임 최대 크기	프레임의 소유권	다중 홉 간 전송 지연	로컬 지연	프레임 재전송 횟수	채널 품질

데이터 프레임의 크기 ϵ_s 와 응용 서비스가 요구하는 전송 지연 ω_s 를 가지고 있다. 데이터 프레임의 평균 처리 시간 \overline{X}_s 는 수식 (1)과 같이 계산한다.

$$\overline{X}_s = 1/\mu_s = \overline{t_{backoff}} + \frac{\epsilon_s}{CQ_s} + C \quad (1)$$

$$C = T_{RTS} + T_{CTS} + T_{ACK} + 3T_{SIFS} + \delta \approx 220\mu s \quad (2)$$

$$\overline{t_{backoff}} = \sum_{k=0}^x p^k \sum_{j=1}^{2^k CW_{min}} \frac{1}{2^k CW_{min}} j + \sum_{i=x}^{n_{retry}} p^i \sum_{g=1}^{CW_{max}} \frac{1}{CW_{max}} g, \quad (3)$$

$$x = \log_2 \frac{CW_{max}}{CW_{min}}$$

수식 (1)에서 $\overline{t_{backoff}}$ 는 IEEE 802.11에서 사용되는 평균 백오프 시간을 나타내며 CQ_s 는 현재 네트워크 상태의 채널 품질에 의해 결정되는 전송 가능한 최대 대역폭을 나타낸다. 그리고 C 는 단일 홉 기반에서 MAC 제어 프레임의 전송으로 인한 오버헤드로 수식 (2)와 같이 계산한다.

수식 (2)에서 T_{RTS} 는 RTS 프레임의 전송 시간, T_{CTS} 는 CTS 프레임의 전송 시간, T_{ACK} 는 ACK 프레임의 전송 시간이다. 이러한 3개의 RTS/CTS/ACK 프레임을 보내기 전에 SIFS(Short Inter-Frame Space) 만큼 기다려야 하는데, T_{SIFS} 시간을 이용하여 계산한다. δ 는 전파지연 시간이다. 이러한 제어 프레임의 크기는 고정적이므로 상수 시간으로 가정한다.

평균 백오프 시간 $\overline{t_{backoffs}}$ 는 수식 (3)으로 계산한다. 수식 (3)에서 p 는 무선 매체가 유희하지 않을 확률이고 n_{retry} 는 IEEE 802.11 MAC에서 사용되는 프레임의 재전송 횟수이다. IEEE 802.11에서 사용되는 최소 경합 윈도우 크기 (CW_{min} : Minimal Contention Window size)와 최대 경합 윈도우 크기 (CW_{max} : Maximal Contention Window size)의 비율은 x 로 나타낸다. IEEE 802.11에서 백오프 과정은 다음과 같다. 경합 윈도우의 크기를 최소 경합 윈도우 크기의 범위 내에서 임의로 선택하여 백오프를 수행 한 후에 무선 매체를 검사한다. 무선 매체가 유희하면 데이터 프레임을 전송하지만, 유희하지 않으면 경합 윈도우의 선택 범위를 2배로 증가시켜 백오프를 수행한다. 이 경우에 경합 윈도우의 선택 범위가 최대 경합 윈도우 크기에 도달하면 더 이상 증가하지 않는다. 수식 (3)에서 오른쪽 첫 번째 항은 경합 윈도우의 선택 범위가 증가하는 구간에서 평균 백오프 시간을 나타

내고, 두 번째 항은 경합 윈도우의 선택 범위가 최대 경합 윈도우 크기에 도달한 상태에서의 평균 백오프 시간을 나타낸다.

개별 서비스 s 의 사용률 $\rho_s = \lambda_s/\mu_s$ 이고 이는 수식 (4)를 만족해야 하며, 그렇지 않은 경우에 새로 요청된 서비스의 수락을 허용하지 않는다.

$$\sum_{s=1}^S \rho_s < 1 \quad (4)$$

W_k 는 무선 단말에 현재 $k-1$ 개의 응용 서비스가 수행 중이고, 새로운 k 번째 응용 서비스가 추가되는 경우에 새로운 응용 서비스의 데이터 프레임이 큐에서 평균적으로 대기하는 시간을 나타낸다. 한편, 이전에 수행 중인 응용 서비스가 없는 상태에서 새로운 응용 서비스가 추가될 때, 데이터 프레임이 큐에서 평균적으로 대기하는 시간인 W_1 은 수식 (5)과 같이 계산된다.

$$W_1 = R + \frac{1}{\mu_1} N^1 \quad (5)$$

$$N^1 = \lambda_1 W_1 \quad (6)$$

$$W_1 = \frac{R}{1 - \rho_1} \quad (7)$$

수식 (5)에서 응용 서비스의 데이터 프레임이 큐에서 평균적으로 대기하는 시간은 현재 처리 중인 데이터 프레임이 처리되는 평균 시간인 R 과 프레임 큐에서 대기 중인 각 프레임의 처리가 완료되는데 소요되는 시간($1/\mu_s \times N_s = \sum \rho_s \times W_s$)의 합으로 표현된다. 큐에 대기 중인 프레임의 수는 리틀의 법칙 (Little's law)에 의해 프레임의 도착률(λ)과 프레임의 평균대기 시간(W)의 곱으로 계산하며, 수식 (6)과 같다. 수식 (6)을 수식 (5)에 대입하여 W_1 에 대해 정리하면 수식 (7)과 같다. 수식 (5)에서 수식 (12)까지 사용된 “아래첨자와 위첨자에서 사용된 값 (예를 들어 수식 (5)에서는 1로 사용됨)”은 수행 중인 응용 서비스의 개수이다.

무선 단말에서 1개의 응용 서비스가 처리 중인 경우에, 새로운 서비스 1개가 요청되는 경우에는 W_2 로 표현하며, 새로운 서비스의 평균대기 시간은 수식 (8)과 같다. DNSQ-MAC에서는 이미 수행 중인 응용 서비스에서 생성한 데이터 프레임의 처리 시간에 영향을 미치지 않으면서, 최대한 많은 서비스가 수행

되도록 한다. 이에 수식 (8)에서 새로운 서비스의 평균 대기 시간은 현재 수행 중인 데이터 프레임의 평균 처리 시간인 R과 큐에 대기 중인 기존의 응용 서비스에서 생성한 데이터 프레임의 처리 시간(N^1/μ_1)과 새로운 응용 서비스에서 생성한 데이터 프레임의 처리 시간(N^2/μ_2), 그리고 큐에 대기 중인 새로운 응용 서비스의 데이터 프레임이 처리되는 동안 새롭게 들어온 데이터 프레임의 처리 시간의 합($\lambda_1 W_2/\mu_1$)으로 계산한다. 수식 (8)에 수식 (6)을 대입하여 W_2 에 대하여 정리하면 수식 (9)와 같다.

$$W_2 = R + \frac{1}{\mu_1} N^1 + \frac{1}{\mu_2} N^2 + \frac{1}{\mu_1} \lambda_1 W_2 \quad (8)$$

$$W_2 = \frac{R}{(1-\rho_1)(1-\rho_1-\rho_2)} \quad (9)$$

수식 (7)과 수식 (9)를 일반화하여 k번째 서비스의 평균대기 시간을 계산하면 수식 (10)과 같다.

$$W_k = \frac{R}{(1-\rho_1-\dots-\rho_{k-1})(1-\rho_1-\dots-\rho_k)} \quad (10)$$

$$= \frac{R}{\left(1-\sum_{i=1}^{k-1} \rho_i\right)\left(1-\sum_{j=1}^k \rho_j\right)}$$

현재 처리 중인 프레임의 처리가 완료되는데 소요되는 평균 시간 R은 M/G/1 큐잉 이론을 사용하여 수식 (11)로 계산된다.

$$R = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \lambda_i \overline{X_i^2} \quad (11)$$

k번째 응용 서비스에서 생성한 데이터 프레임의 평균 전송 지연(T_k)은 데이터 프레임이 큐에서 평균적으로 대기 하는 시간(W_k)과 프레임의 처리 시간 ($1/\mu_k$)의 합이며, 이는 수식 (12)와 같다.

$$T_k = \frac{1}{\mu_k} + W_k \quad (12)$$

무선 단말에서 현재 수행 중인 서비스에 대한 정보는 그림 1과 표 1에서 제시한 서비스 정보 테이블에 저장된다. 서비스 정보 테이블에 저장된 정보를 이용하여 수식 (1), 수식 (10), 수식 (12)를 계산하면 다음과 같다.

$$\overline{X_{sid}} = 1/\mu_{sid} = t_{backoff} + (FL_{sid}/CQ_{sid}) + C \quad (13)$$

$$W_{\neq w} = \frac{\frac{1}{2} \sum_{sid \in S} FP_{sid} \overline{X_{sid}^2} + FP_{\neq w} \overline{X_{\neq w}^2}}{\left(1 - \sum_{sid \in S} \frac{FP_{sid}}{\mu_{sid}}\right) \left(1 - \sum_{sid \in S} \frac{FP_{sid}}{\mu_{sid}} - \frac{FP_{\neq w}}{\mu_{\neq w}}\right)} \quad (14)$$

$$T_{\neq w} = \frac{1}{\mu_{\neq w}} + W_{\neq w} \quad (15)$$

수식 (13)에서 $\overline{X_{sid}}$ 는 응용 서비스 sid에서 생성한 데이터 프레임의 평균 처리 시간이다. 수식 (14)에서 W_{new} 는 새로 추가된 서비스의 데이터 프레임이 큐에서 평균적으로 대기하는 시간이다. 수식 (15)에서 T_{new} 는 새로 추가된 서비스의 데이터 프레임에 대한 총 지연시간이다. 이러한 과정을 통하여 DNSQ-MAC에서는 새로 추가된 서비스의 데이터 프레임에 대한 총 지연시간인 T_{new} 가 앞에서 정의한 새로운 응용 서비스가 요구하는 전송지연 시간인 ω_s 보다 작으면 새로운 응용 서비스를 수락하고 그렇지 않으면 수락을 허용하지 않는다.

새로운 응용 서비스가 수락되면 DNSQ-MAC 관리자는 응용 서비스의 속성 정보를 서비스 정보 테이블에 추가한다. 그리고 출발지 단말과 목적지 단말 간의 전송경로를 구성하는 각 홉의 로컬 지연시간을 계산하기 위해 LDM(Local Delay Measurement) 요청 프레임을 전송한다. LDM 요청 프레임의 구조는 표 2와 같다.

표 2에서 보는 바와 같이 프레임 종류 필드는 0x01 이면 LDM 요청 프레임을 나타내고 0x02이면 LDM 응답 프레임을 나타내는 1바이트 크기의 필드이다. 출발지 단말 주소와 목적지 단말 주소 필드는 응용 서비스의 출발지 단말과 목적지 단말의 주소를 나타낸다. 홉 수는 출발지 단말과 목적지 단말 간의 네트워크 홉 수를 나타낸다. LDM 요청 프레임을 수신한 목적지 단말은 LDM 응답 프레임을 출발지 단말에게 전송한다. LDM 응답 프레임의 구조는 표 3과 같다.

프레임 종류 필드는 LDM 응답 프레임을 나타내는 0x02로 저장하고, 홉 수 필드는 LDM 요청 프레임의 홉 수 값을 이용한다. 로컬 지연 시간 필드에는 각 홉의 로컬 지연시간이 저장된다.

표 2. LDM 요청 프레임의 구조

프레임 종류	출발지 단말 주소	목적지 단말 주소	홉 수
1바이트 (0x01)	6바이트	6바이트	1바이트

표 3. LDM 응답 프레임의 구조

프레임 종류	출발지 단말 주소	목적지 단말 주소	홉수	로컬 지연시간			
				LD ¹	LD ²	...	LD ^H
0x02			H				

그림 2는 LDM 프레임의 처리 과정을 보여준다. 출발지 단말 S는 시간 t_0 에서 홉 수 필드를 0으로 설정하여 LDM 요청 프레임을 목적지 단말 D로 전송한다. 출발지 단말과 목적지 단말 간의 전송 경로 상에 존재하는 중간 단말 A는 LDM 요청 프레임의 수신 시점 t_1 과 수신한 프레임의 홉 수 필드를 1 증가시킨 후 프레임의 목적지 단말 D로 전달한 시점 t_2 간의 차인 로컬 지연 시간(LD_s^1)을 계산한다. 이와 같은 방식으로 중간 단말 B는 LD_s^2 를 계산한 후에 해당 LDM 요청 프레임이 목적지 단말에 전송 도착하면 (시점 t_3 - 시점 t_4), 목적지 단말은 LDM 응답 프레임을 출발지 단말에게 전송한다(시점 t_6). 시점 t_7 과 t_9 에서 LDM 응답 프레임을 수신한 중간 단말 B와 A는 전송 지연시간인 LD_s^1 와 LD_s^2 을 LDM 응답 프레임의 로컬 지연시간 필드에 각각 저장한 후에 (시점 t_8 과 t_{10}) 프레임을 출발지 단말로 전달한다. 시점 t_{11} 에서 LDM 응답 프레임이 출발지 단말에 도착하면 출발지 단말은 LDM 요청 프레임을 전송한 시각과 LDM 응답 프레임의 수신 시각을 사용하여 출발지 단말과 목적지 단말 간의 종단 간 전송지연 TD_s 를 계산하며, 이는 수식 (16)과 같다.

$$TD_s = \frac{T_{end} - T_{start}}{2} \tag{16}$$

수식 (16)에서 T_{start} 는 LDM 요청 프레임의 전송시각을 나타내며 그림 2에서의 시점 t_0 이다. T_{end} 는 LDM 응답 프레임의 수신시각을 나타내며 그림 2에서의 시점 t_{11} 이다.

응용 서비스가 요구하는 전송지연 ω_s 를 고려하고 LDM 응답 프레임의 홉 수 필드 값이 H일 때, 개별 홉에서의 최대 로컬 지연 $\overline{LD_s^h}$ 은 수식 (17)과 같다. $\overline{LD_s^h}$ 은 서비스 정보 테이블의 로컬 지연 필드에 저장된다.

$$\overline{LD_s^h} = LD_s^h + \frac{\omega_s - \sum_{h=1}^H LD_s^h}{H} \tag{17}$$

수식 (17)에서 h 는 개별 홉을 나타내고, LD_s^h 는 LDM 응답 프레임에 저장된 개별 홉의 로컬 지연 시간을 나타낸다.

개별 홉의 로컬 지연이 계산되면 ESTF 스케줄러는 DNSQ-MAC의 프레임 큐에 들어있는 데이터 프레임을 스케줄링한다. ESTF 스케줄러는 현재 네트워크 상태에서 데이터 프레임의 마감시한을 보장하기 위하여 최대 지연 가능한 데이터 프레임의 전송 시작 시각을 재계산한 후에 마감 시한이 가장 짧은 데이터 프레임을 먼저 전송한다. 마감 시한이 가장 짧은 프레임을 계산하는 과정은 다음과 같다. FGT_s

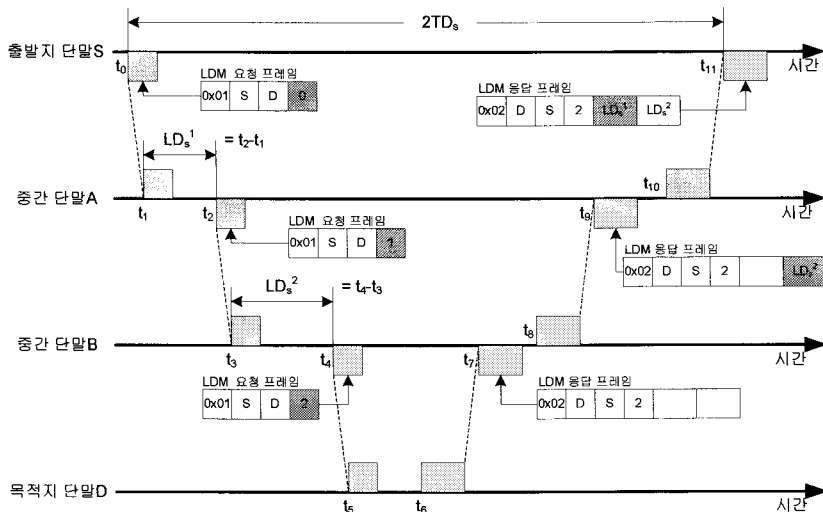


그림 2. LDM 프레임의 처리 과정

는 출발지 단말 S의 응용 서비스에서 데이터 프레임
을 생성한 시각을 나타내고, FAT_s^h 는 출발지 및 목적
지 단말의 전송 경로 상에 있는 중간 단말에 데이터
프레임이 도착한 시각을 나타낸다. FRC_s 는 데이터
프레임의 재전송된 횟수를 나타낸다. 데이터 프레임
의 마감 시한을 보장하는 수식 (18)에서 사용되는 가
상의 전송 시작 시각 VST_s 는, 수식 (1)과 수식(17)을
이용하여 계산된다.

$$VST_s^{h,i} = \begin{cases} FGT_s^i - \bar{X}_s \times FRC_s^{i-1} + \overline{LD}_s & h=0 \\ FAT_s^{h,i} - \bar{X}_s^h \times FRC_s^{h,i-1} + \overline{LD}_s^h + VST_s^{h-1,i} - FST_s^{h-1,i} & h > 0 \end{cases} \quad (18)$$

수식 (18)에서 첨자 i 는 i 번째 데이터 프레임을 나
타내고, FST_s 는 데이터 프레임의 실제 전송 시각을
나타낸다. 수식 (18)에서 h 가 0인 경우는 출발지 단말
에서 데이터 프레임이 전송되는 경우이고, h 가 0보다
큰 경우는 중간 단말에서 데이터 프레임이 전달되는
경우이다. 수식 (18)에서 보는 바와 같이 데이터 프레
임의 평균 처리 시간과 프레임의 재전송 횟수를 곱하
여 가상의 전송 시작 시각 계산에 반영함으로써,
DNSQ-MAC에서는 현재의 네트워크 상태에 따라
최대 FRC_s 번의 데이터 프레임 전송 시도를 보장한
다. 데이터 프레임이 예정된 전송 완료 시간
($FGT_s + LD_s$)보다 일찍 다음 홉에 도착하는 경우, 이
를 반영하지 못한다면, 홉을 거듭할수록 데이터 프레
임은 빠르게 전송될 것이다. 이에 중간 단말에서 데
이터 프레임이 전달되는 경우에는 이전 홉에서의 가
상 전송 시작 시각과 데이터 프레임의 실제 전송 시

각의 차이($VST_s - FST_s$)를 반영하여 가상의 전송 시
작 시각을 재계산한다. ESTF 스케줄러는 DNSQ-
MAC의 프레임 큐에 들어있는 데이터 프레임 중에
서 VST_s 값이 가장 작은 데이터 프레임을 전송하여
데이터 프레임의 마감시한을 보장하고자 한다. 데이
터 프레임이 단말의 프레임 큐에서 대기한 시간이
 VST_s 값을 초과하면, 데이터 프레임은 전송되어도 목
적지 단말에서 마감시한을 초과한다. 따라서 해당 데
이터 프레임은 출발지 단말에서 폐기한다. 데이터 프
레임이 전송되면, 네트워크 동적 관리 모듈은 IEEE
802.11 MAC계층과 물리 계층을 이용하여 데이터 프
레임의 재전송 횟수(FRC)와 물리 매체의 상태 정보
(CQ)를 획득하여 서비스 정보 테이블에 저장한다.

지금까지 기술한 내용을 기반으로 DNSQ-MAC
에서 데이터 프레임을 처리하는 과정을 요약하면 그
림 3과 같다. DNSQ-MAC에서는 응용 서비스의 트
래픽 정보와 MAC 계층에서 획득한 백오프 정보와
물리 계층에서 획득한 무선 채널 상태 정보를 바탕으
로 큐잉 이론을 이용하여 새로운 서비스의 수락 여부
를 결정한다. 수락 여부가 결정되면 데이터 프레임이
다중 홉 간에 전송될 때 발생하는 로컬 지연을 계산
하기 위해 LDM 프레임을 전송하여 로컬 지연을 측
정한다. 상위 계층으로부터 데이터 프레임 도착하면,
MAC 계층에서 획득한 재전송 상황 정보와 측정된
로컬 지연을 바탕으로 데이터 프레임의 전송 시작
시점을 재계산한다. 재계산된 전송 시작 시점을 기
준으로 마감시한이 가장 짧은 데이터 프레임을 스케
줄링하여 MAC 계층에게 전달하고, 최종적으로 물리

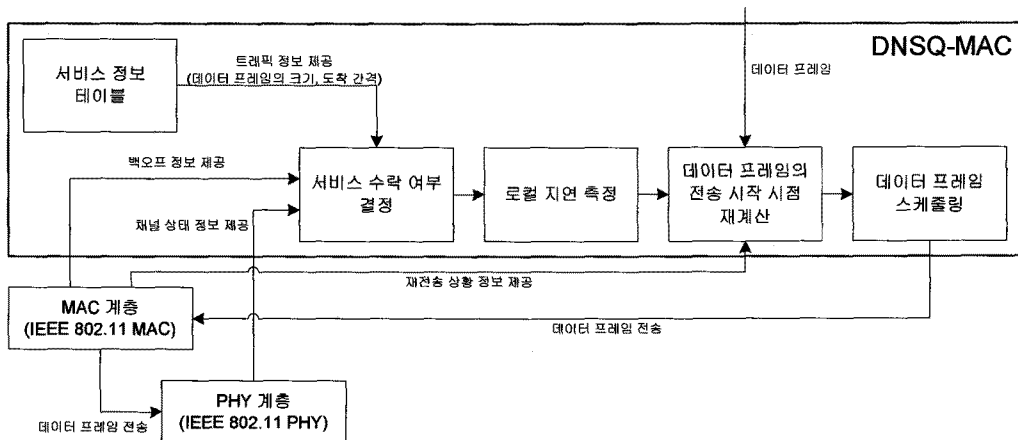


그림 3. DNSQ-MAC에서 데이터 프레임의 처리 과정

계층으로 전달되어 데이터 프레임이 전송된다.

4. 성능 분석

본 논문에서 제안한 DNSQ-MAC 기법의 성능 분석을 위한 실험 환경은 Qualnet 3.9 모의실험 도구를 이용하여 개발하였다. 개발한 모의실험 환경에서 좁은 다중 경로에서 전송되는 MAC 프레임의 마감시한에 대한 DNSQ-MAC 기법의 성능을 분석함과 동시에 MAC 계층의 상위 계층인 네트워크 계층에서 동작되는 다양한 라우팅 프로토콜 및 패킷 스케줄러와 DNSQ-MAC 기법간의 의존성을 분석한다.

성능 분석을 위하여 데이터 전송 서비스와 VoIP(Voice over IP) 기반의 음성 서비스, 그리고 VOD(Video On Demand) 기반의 멀티미디어 서비스가 개별 무선 단말에서 실행된다. 데이터 전송 서비스는 평균 도착 간격이 5ms를 가지는 포와송 프로세스에 따라 고정된 1500바이트 크기의 데이터 프레임을 전송한다. VoIP(Voice over IP) 기반의 음성 서비스는 G.711 코덱의 표준 사양에 따라 80바이트 크기의 프레임을 10ms의 간격으로 전송한다[14]. VOD(Video on Demand) 기반의 멀티미디어 서비스는 H.264 코덱의 표준 사양에 따라 최대 384kbps의 전송률로 데이터 프레임을 전송한다[15].

DNSQ-MAC 기법의 비교 대상으로는 기존의 무선 네트워크에서 가장 많이 사용되고 있는 표준 통신 프로토콜인 IEEE 802.11과 IEEE 802.11에서 QoS를 제공하는데 사용되는 표준 통신 프로토콜인 IEEE 802.11e를 사용하였다. 이를 통해 응용 서비스의 QoS가 MAC 계층에서 제공될 수 있음을 확인하고자 한다.

먼저 최대 전송 거리가 100m인 개별 무선 단말을 100m * 100m의 지역에 임의로 분포한 단일 홉 애드

혹 기반의 무선 네트워크 환경에서 성능을 분석하였다. 음성 서비스 및 멀티미디어 서비스에서는 데이터 프레임을 마감시한 내에 목적지 단말로 전송해야 하고, 마감시한을 초과한 데이터 프레임을 전송하는 것은 비효율적이다. 따라서 성능 분석을 위해 출발지 단말과 목적지 단말간의 전송지연 및 출발지 단말의 응용 서비스에서 생성된 데이터 프레임의 마감시한 초과율, 그리고 데이터 프레임의 유효 처리율(유효 처리율 = 1 - 마감시한을 초과한 데이터 프레임의 양 / 목적지 단말에서 수신한 총 데이터 프레임의 양)을 분석하였다.

그림 4에서 보는 바와 같이 데이터를 전송하는 단말의 수가 5개 미만일 경우에는 각 단말이 전송하는 데이터의 총량이 무선 채널의 수용량보다 적기 때문에, DNSQ-MAC과 IEEE 802.11, 그리고 IEEE 802.11e이 비슷한 성능을 보여준다. 그러나 단말의 수가 5개를 초과하여 데이터 총량이 무선 채널의 수용량보다 증가하면, IEEE 802.11과 IEEE 802.11e의 경우에는 전송 지연과 마감시한 초과율이 지속적으로 증가함을 확인할 수 있다.

DNSQ-MAC 기법에서는 데이터 프레임의 마감시한을 보장하고자 각 응용 서비스로부터 생성된 데이터 프레임의 최대 지연 가능한 시간을 재계산한다. 따라서 그림 4에서 보는 바와 같이 무선 단말의 수가 증가하더라도 종단 간 전송지연 및 마감시한 초과율을 보장하여 유효처리율을 향상시킬 수 있다.

IEEE 802.11 MAC은 응용 서비스의 QoS 요구사항을 고려하지 않고, 생성된 데이터 프레임의 전송만을 고려한다. 따라서 트래픽을 생성하는 무선 단말의 수가 증가하면, IEEE 802.11 MAC에서는 매체 접근의 충돌로 인해 데이터 프레임의 전송이 지연되고 종단 간 전송 지연과 마감시한 초과율이 급격하게 증가하므로 유효처리율은 감소한다.

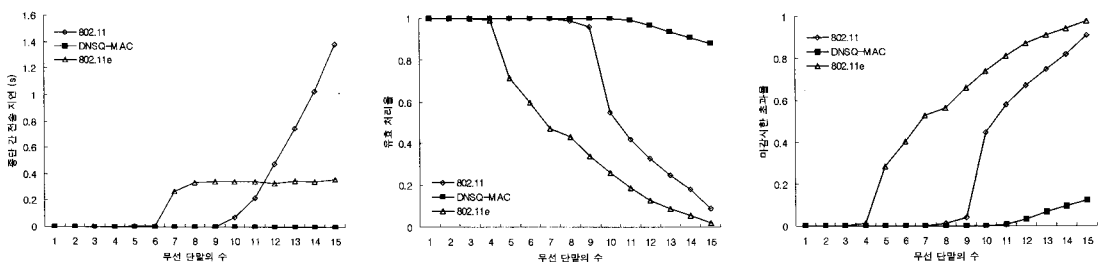


그림 4. 단일 홉 환경에서 성능 분석

한편 IEEE 802.11e MAC에서는 우선순위가 높은 데이터 프레임이 짧은 백오프 지연 시간을 가지므로 먼저 무선 매체에 접근이 가능하다. 또한 비콘 구간에서 데이터 프레임의 전송은 일정 시간 내에 이뤄지므로, 데이터 프레임을 전송하는 무선 단말의 수가 증가하여도 중단 간 전송 지연이 일정하게 유지된다. 하지만, IEEE 802.11e에서는 데이터 프레임의 마감 시한을 전혀 고려하지 않는다. 따라서 데이터 프레임을 생성하는 단말의 수가 많은 경우에는 높은 우선순위를 가지는 서비스에서 생성한 데이터 프레임의 전송을 최대한 지연시켜 남은 여유 시간에 낮은 우선순위를 가지는 서비스에서 생성한 데이터 프레임을 전송할 수 있음에도 불구하고, 높은 우선순위를 가지는 서비스가 짧은 백오프 지연을 사용하여 먼저 매체에 접근하므로 결국에는 모든 네트워크 대역폭을 선점하게 되어 데이터 프레임의 마감시한이 초과된다.

그림 5는 무선 단말이 홑 간 다중 경로에서 이동하면서 전송한 데이터 프레임의 마감 시한과 MAC 계층의 상위 계층인 네트워크 계층에서 동작되는 라우팅 프로토콜에 대한 DNSQ-MAC 기법의 성능을 분석하였다. 최대 전송 거리가 100m인 개별 무선 단말을 200m * 200m인 지역에 임의로 분포한 환경에서

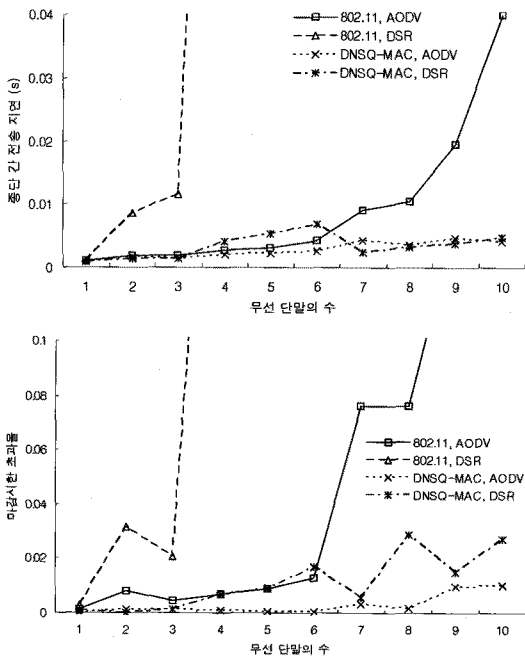


그림 5. 다중 홑 환경에서 라우팅 프로토콜의 의존성 분석

성능을 분석하였다. 무선 단말의 이동성 모델은 분포 지역 내에 임의의 지점을 지정하고, 최대 10m/s 속도로 목표 지점을 향해 직선으로 이동하는 Random Way Point 모델을 이용하였다. 무선 단말은 목표 지점에 도착하면 최소 1초에서 최대 10초까지의 범위에서 임의의 시간동안 대기한 후에 다음 지점으로 이동한다.

그림 5와 그림 6에서 보여 주는 실험은 액세스포인트가 없는 다중 홑 기반의 애드혹 네트워크 환경에서 수행되었다. 따라서 액세스포인트가 요구되는 IEEE 802.11e MAC은 비교 대상에서 제외되었다. 나머지 실험 환경은 그림 4와 동일하다.

그림 5에서 보는 바와 같이 IEEE 802.11 기반에서 동작하는 ADOV나 DSR 프로토콜의 경우에는 데이터를 전송하는 무선 단말의 수가 3개를 초과하는 시점에서 전송 지연과 마감시간 초과율이 크게 증가한다. 그러나 DNSQ-MAC 기법을 적용한 AODV 및 DSR 라우팅 프로토콜에서는 데이터 프레임의 마감시한을 보장하면서 최대 지연 가능한 시간을 재계산하여 데이터 프레임을 전송하기 때문에 AODV나

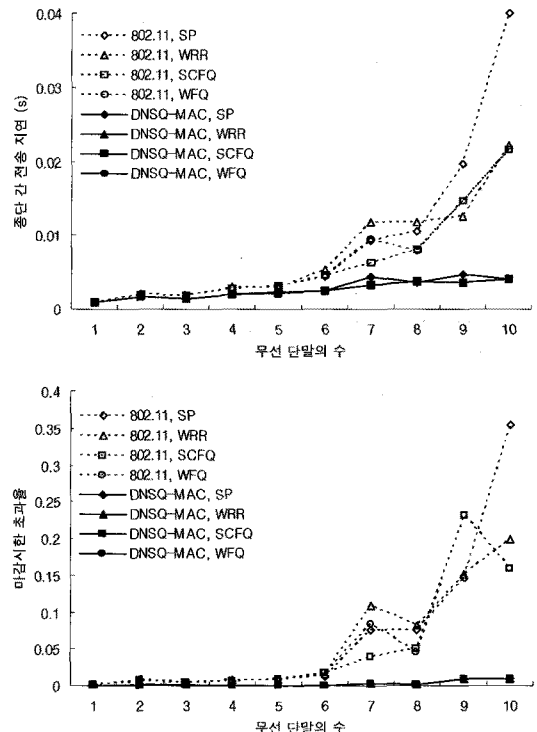


그림 6. 다중 홑 환경에서 패킷 스케줄러와의 의존성 분석

DSR의 경로 탐색을 위한 데이터 프레임이 빠르게 전송되어 종단 간 전송 지연과 마감시한 초과율이 향상된다.

그러나 IEEE 802.11 기반의 MAC에서 DSR 라우팅을 사용하는 경우에는 목적지 단말까지의 경로 정보를 출발지 단말의 캐시 테이블에 저장하고 이를 기반으로 데이터 프레임을 전달하기 때문에 무선 단말이 이동하여 경로가 더 이상 유효하지 않음에도 불구하고 출발지 단말에서는 캐시 정보를 기반으로 응용 서비스의 데이터 프레임이 전송된다. 따라서 경로 정보가 유효하지 않음을 확인하고, 새로운 경로를 탐색하는데 소요되는 시간이 길어지기 때문에 AODV에 비해 종단 간 전송 지연과 마감시한 초과율이 증가한다[16].

마지막으로, IEEE 802.11 기반의 AODV 라우팅 프로토콜에서는 주기적으로 Hello 메시지를 교환하여 라우팅 경로의 유효성을 점검하므로 새로운 경로를 탐색하는데 소요되는 시간이 DSR에 비하여 짧지만, 데이터 프레임을 생성하는 무선 단말이 증가하면 경로 탐색 메시지를 전송하기 위한 무선 매체 접근이 지연되어 종단 간 전송 지연과 마감시한 초과율도 증가한다.

그림 5와 동일한 실험 환경을 사용한 그림 6의 실험에서는 네트워크 계층에서 동작하는 AODV 라우팅 프로토콜과 패킷 스케줄러가 기존의 IEEE 802.11 MAC 계층 위에서 동작하는 경우에 제공할 수 있는 QoS 성능을 분석한다. 그리고 이러한 실험 환경에서 DNSQ-MAC 기법이 추가적으로 적용되는 경우에 제공할 수 있는 QoS 성능을 분석한다.

그림 6의 실험에서 사용되는 네트워크 계층의 패킷 스케줄러는 SP(Strict Priority), WRR(Weighted Round Robin), WFQ(Weighted Fair Queueing) 그리고 SCFQ(Self-Clocked Fair Queueing) 기법이다 [17]. SP 기법은 우선순위가 높은 큐의 패킷을 항상 먼저 전송한다. 따라서 SP 기법에서는 우선순위가 높은 데이터 프레임이 네트워크의 대역폭을 먼저 독점하여 우선순위가 낮은 데이터 프레임의 마감시한이 초과될 수 있다. WRR 기법은 패킷 단위로 라운드 로빈 스케줄링을 수행한다. 이 기법에서는 데이터 프레임의 마감시한 보장을 고려하지 않고, 네트워크 대역폭을 공정하게 사용하는 것만 고려하였기 때문에 데이터 프레임의 우선순위와 상관없이 모든 데이

터 프레임의 마감시한이 초과될 수 있다. WFQ와 SCFQ 기법은 공통적으로 패킷 단위의 라운드 로빈 스케줄링을 제공함과 동시에 패킷의 마감시한이 짧은 데이터 프레임을 우선적으로 전송한다.

그림 6에서 보는 바와 같이 IEEE 802.11 기반에서 동작하는 패킷 스케줄러에 비해, DNSQ-MAC에서 동작하는 패킷 스케줄러가 짧은 전송지연과 낮은 마감시간 초과율을 보여준다. IEEE 802.11 기반에서는 각 패킷 스케줄러에 대해 뚜렷한 성능 차이를 보여주지만, DNSQ-MAC 기반에서는 패킷 스케줄링이 MAC 계층에서 수행되기 때문에 각 패킷 스케줄러에 대해 향상된 성능을 보여준다.

그림 6에서 보는 바와 같이 마감시한을 고려하는 WFQ와 SCFQ 기법을 IEEE 802.11 MAC 계층에 적용하는 경우에 다른 패킷 스케줄러보다 나은 QoS 성능을 제공하지만 데이터 프레임의 마감시한을 계산하는 과정에서 무선 채널 품질이 낮거나 전송하고자 하는 데이터 프레임의 증가하여 무선 매체의 접근의 잦은 충돌과 이로 인한 데이터 프레임의 재전송이 발생하는 무선 네트워크 상황을 고려하지는 않는다. 따라서 그림 6에서 보는 바와 같이 트래픽을 생성하는 무선 단말의 수가 증가하는 경우에 종단간 전송 지연이 발생하게 되어 마감시한이 짧은 데이터 프레임의 평균대기 시간이 길어지게 된다. 이러한 상황이 계속 발생되면 결국엔 데이터 프레임의 마감시한 초과율도 증가하게 된다. 그러나 DNSQ-MAC 기법에서는 네트워크 계층에서 동작하는 패킷 스케줄러에 의해 선출된 데이터 프레임이 DNSQ-MAC의 프레임 큐에 저장되면, 무선 네트워크 동적 상태를 고려하여 데이터 프레임의 최대 지연 가능한 전송 시간을 재계산하는 ESTF 스케줄링 기법이 수행된다. DNSQ-MAC 기법은 동적 네트워크 상황을 고려하여 프레임 큐에 저장된 데이터 프레임의 마감시한을 재계산하기 때문에 네트워크 계층의 패킷 스케줄러와는 독립적으로 종단 간 전송 지연과 마감시한 초과율에서 향상된 성능을 제공할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 애드혹 기반의 무선 네트워크 환경에서 응용 서비스가 생성한 데이터 프레임의 마감시한을 보장하여 응용 서비스의 QoS를 2.5 계층에서

제공할 수 있는 DNSQ-MAC 기법을 제안하였다. DNSQ-MAC 기법은 데이터 프레임의 마감시한을 보장할 수 있는 최대 지연 가능한 전송 시간을 계산하기 위하여 동적으로 변하는 네트워크의 상태와 IEEE 802.11 MAC에서 수행되는 백오프 및 재전송 상황을 고려한다. IEEE 802.11 MAC에서 수행한 백오프 시간과 무선 채널의 품질을 고려하여 패킷 전송에 필요한 시간을 계산하고, 재전송 상황에 따라 마감시한을 보장하기 위해 필요한 전송 시작 시각을 재계산한다. 그리고 현재 수행 중인 서비스의 마감시한을 보장하면서 최대한 많은 서비스가 수행될 수 있도록 새로운 서비스의 추가 여부를 큐잉 이론을 이용하여 분석한다. 2.5 계층에서 동작하는 DNSQ-MAC 기법은 기존의 IEEE 802.11 MAC 계층 위에서 동작할 수 있기 때문에 기존 IEEE802.11 기반 무선 네트워크와의 호환성을 유지할 수 있다.

제안한 기법의 성능을 분석한 결과, DNSQ-MAC 기법은 단일 홉 및 다중 홉 환경에서 IEEE 802.11과 비교하여 유효처리율이 30% 향상되고, 마감시한 초과율이 50% 감소함을 확인하였다. 또한 상위 계층인 네트워크 계층에서 동작되는 다양한 라우팅 프로토콜 및 패킷 스케줄러와의 비교에서도 DNSQ-MAC 기반의 라우팅 프로토콜 및 패킷 스케줄러는 IEEE 802.11 기반의 라우팅 프로토콜과 패킷 스케줄러에 비해 마감시한 초과율이 20% 향상됨을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das, "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing," *IETF RFC 3561*, 2003.
- [2] D. Johnson, Y. Hu, and D. Maltz, "The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4," *IETF RFC 4728*, 2007.
- [3] IEEE, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 8: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements," *IEEE Std 802.11e*, 2005.
- [4] N. Vaidya, A. Dugar, S. Gupta, and P. Bahl, "Distributed Fair Scheduling in a Wireless LAN," *IEEE Transaction on Mobile Computing*, Vol.4, No.6, 2005.
- [5] A. Banchs and X. Perez, "Distributed Weighted Fair Queuing in 802.11 Wireless LAN," *Proc. IEEE International Conference on Communication*, Vol.5, pp. 3121-3127, 2002.
- [6] A. Banchs and X. Perez, "Providing Throughput Guarantees in IEEE 802.11 Wireless LAN," *Proc. of Wireless Communications and Networking Conference*, Vol.1, Orlando, FL, pp. 130-138, 2002.
- [7] Y. Ge and J. Hou, "An Analytical Model for Service Differentiation in IEEE 802.11," *Proc. of IEEE International Conference on Communication*, Anchorage, AK, Vol.2, pp. 1157-1162, 2003.
- [8] W. Pattara-Atikom, S. Banerjee, and P. Krishnamurthy, "Starvation Prevention and Quality of Service in Wireless LANs," *Proc. of 5th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communication*, Vol.3, Honolulu, HI, pp. 1078-1082, 2002.
- [9] Y. Zhou, A.L. Ananda, and L. Jacob, "A QoS Enabled MAC Protocol for Multi-hop Ad Hoc Wireless Networks," *Proc. of IEEE International Performance Computing and Communications Conference*, Vol.1, Phoenix, AZ, pp. 149-156, 2003.
- [10] M. Sarkar, S. Guiral, and S. Kumar, "A QoS-Aware Medium Access Control Protocol for Real Time Traffic in Ad Hoc Networks," *Proc. of 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Vol.1, Athens, Greece, pp. 1-5, 2007.
- [11] V. Kanodia, C. Li, A. Sabharwal, B. Sadeghi, and E. Knightly, "Ordered Packet Scheduling in Wireless Ad Hoc Networks: Mechanisms and Performance Analysis," *Proc. of 3rd ACM International Symposium on Mobile ad hoc networking & Computing*, Lausanne, Switzerland, pp. 58-72, 2002.
- [12] D. Wang and K. Liu, "A Novel QoS MAC

Protocol for Multi-hop Ad Hoc Networks," *Proc. of International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, Vol.1, Shanghai, China, pp. 1484-1487, 2007.

- [13] A. Jain, D. Qiao, and K. Shin, "RT-WLAN: A Soft Real-Time Extension to the ORiNOCO Linux Device Driver," *Proc. of Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Vol.2, Beijing, China, pp. 1434-1440, 2003.
- [14] ITU-T, "Pulse Code Modulation (PCM) of Voice Frequencies, ITU-T Recommendation G.711," *ITU-T Standard*, 1993.
- [15] K. Nahrstedt and R. Steinmetz, "Resource Management in Networked Multimedia Systems," *IEEE Journal of Computer*, Vol.28, No.5, pp 52-63, 1995.
- [16] S. Das, C. Perkins, and E. Royer, "Performance Comparison of Two On-Demand Routing Protocols for Ad Hoc Networks," *Proc. of IEEE Conference on Computer Communications*, Vol.1, Tel Aviv, Israel, pp. 3-12, 2000.
- [17] F. Cottet, J. Delacroix, and Z. Mammeri, *Scheduling in Real-Time Systems*, John Wiley & Sons, 2002.



이 동 건

2005년 2월 신라대학교 컴퓨터교육과 (학사)
 2007년 2월 부산대학교 컴퓨터공학과 (석사)
 2007년 3월~현재 부산대학교 컴퓨터공학과 박사과정

관심분야 : 무선 네트워크, QoS, 실시간 시스템



김 병 훈

2006년 2월 부산대학교 정보 컴퓨터 공학부 (학사)
 2006년~현재 부산대학교 컴퓨터 공학과 석사과정
 관심분야 : 메쉬 네트워킹, TCP/IP 통신, 실시간 시스템, 큐잉 이론



탁 성 우

1995년 부산대학교 컴퓨터공학과 (학사)
 1997년 부산대학교 컴퓨터공학과 (석사)
 2003년 미국미주리주립대학교 Computer Science (박사)

2004년~현재 부산대학교 정보컴퓨터공학부 부교수
 2004년~현재 부산대학교 컴퓨터 및 정보통신연구소 겸임 연구원

관심분야 : 유무선 네트워크, SoC 설계, 실시간 시스템, 워치인식, 최적화 기법, 그래프 이론, 큐잉 이론