

# 이동 애드혹 망에서 QoS 지원을 위한 예약 기반의 MAC 프로토콜

정회원 조인휘\*

## A Reservation-based MAC Protocol for QoS Support in Mobile Ad-Hoc Networks

Inwhae Joe\* *Regular Member*

요 약

본 논문에서는 이동 애드혹 망에서 멀티미디어 트래픽 처리를 위해 예약 방식의 매체 접근 제어(MAC) 프로토콜을 설계하고 그 성능을 평가하였다. 예약 방식의 MAC 프로토콜은 두 개의 부분 계층으로 이루어진 계층적 접근법을 기반으로 한다. MAC의 하위 부분 계층은 이동 애드혹 망에서 비동기 데이터 트래픽을 지원하기 위해 CSMA/CA를 사용하는 기본적인 접근 방법을 제공한다. 그 위에 상위 부분 계층은 실제 데이터 전송에 앞서 슬롯(slot) 예약을 수행함으로써 실시간 주기적 트래픽을 지원한다. 제안된 프로토콜은 ns-2 시뮬레이터를 사용하여 검증하였다. 시뮬레이션 수행 결과는 예약 방식의 MAC 프로토콜이 IEEE 802.11 표준과 비교하여 더 높은 처리율(throughput)과 더 낮은 지연(delay)을 제공하므로 실시간 트래픽 전송에 적합함을 보여주었다.

**Key Words** : MAC, QoS, Reservation, Mobile Ad-Hoc Networks, Multimedia

ABSTRACT

This paper presents the design of a reservation-based MAC protocol to support multimedia traffic over mobile ad-hoc networks and evaluates its performance. Our MAC protocol is based on a hierarchical approach consisting of two sub-layers. The lower sub-layer of the MAC protocol with reservation provides a fundamental access method using CSMA/CA in order to support asynchronous data traffic over mobile ad-hoc networks. The upper sub-layer supports real-time periodic data by making a slot reservation before transmitting actual data. The proposed protocol has been validated through simulations using ns-2. The results show that the proposed MAC protocol can offer higher throughput and lower delay than standard implementations of the IEEE 802.11.

### I. 서론

이동 애드혹 망은 기반 구조 망과 다르게 기지국이나 액세스 포인트와 같은 인프라가 없다. 따라서 중앙 집중화된 조정자 또한 없기 때문에 IEEE 802.11 표준의 PCF와 같은 방법은 이동 애드혹 망

에서 동작하지 않을 것이다. 또한 PCF 없이 DCF만 단독으로 사용해서는 실시간 트래픽의 지연 요구사항을 만족시킬 수 없다. 즉, 멀티미디어 트래픽을 지원하기에 충분하지 않다.

IEEE 802.11 표준 중 QoS와 관련된 문제를 보완하는 작업을 수행하는 그룹이 TGe이다<sup>[1]</sup>. TGe에서

※ 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터(IITA-2006-C1090-0603-0047) 지원으로 수행되었습니다.

\* 한양대학교 정보통신학부 부교수 (iwjoo@hanyang.ac.kr)

논문번호 : KICS2005-07-267, 접수일자 : 2006년 7월 4일, 최종논문접수일자 : 2006년 10월 9일

는 현재 표준화가 진행되고 있으며, 기본적인 동작 방식은 각 사용자별 또는 패킷 스트림별로 순위 차별화를 통한 패킷 스케줄링이 주요 알고리즘이라 할 수 있다. HCF(Hybrid Coordination Function)와 기존의 DCF의 개정판인 EDCF(Enhanced DCF)를 제안하고 있으며 하위 호환이 이루어지도록 되어 있다. HCF는 기존 PCF 기반으로 개선된 것이지만 복합 조정자 HC(Hybrid Coordinator)의 경우 노드들의 상태를 관리하고 비경쟁 기간 CFP(Contention Free Period)에서 전송 기회를 지능적으로 할당할 수 있는 메커니즘을 갖고 있다.

또한 현재까지 무선망에서 슬롯 예약을 위한 많은 알고리즘들이 제안되었다<sup>4,5,6</sup>. 그러나 글로벌 클럭(global clock)을 유지하고 타임 슬롯을 할당하는 중앙 집중 조정자의 존재에 의존적인 중앙 집중 알고리즘으로 판별되었다. 따라서 그것들은 중앙 집중 개념이 없는 이동 애드혹 망에 적용할 수 없다.

따라서 본 논문에서는 이동 애드혹 망에서 비동기 데이터 트래픽과 실시간 데이터 트래픽 전송을 포함하는 멀티미디어 트래픽을 위한 새로운 MAC 프로토콜을 제안하고자 한다. 제안하는 프로토콜은 실시간 트래픽을 지원하기 위해 DCF 위에서 PCF를 사용하는 대신 예약 조정 함수 RCF(Reservation Coordination Function)를 사용한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 본 논문에서 제안하는 예약 방식의 MAC 프로토콜을 설명한 다음, 3장에서는 시뮬레이션을 통해 제안된 프로토콜의 성능을 평가하고 마지막으로 4장에서 결론을 맺는다.

## II. 예약 방식 MAC 프로토콜

### 2.1 프로토콜 구조

예약 방식의 MAC 프로토콜(예약 CSMA/CA)은 이동 애드혹 망에서 멀티미디어 데이터 전송을 지원하기 위하여 설계되어졌다. 예약 CSMA/CA는 그림 1과 같이 2개의 부분 계층으로 구성된 계층적 접근법을 기본으로 한다.

IEEE 802.11 표준과 같이 하위 부분 계층은 DCF로 비동기(asynchronous) 데이터 전송을 지원하기 위한 기본적인 접근 방법을 제공한다. RCF라 불리는 상위 부분 계층은 예약 조정 함수로써 실제 데이터 전송에 앞서 슬롯 예약을 수행함으로써 실시간 주기적 트래픽을 지원하기 위해 DCF 위에 구현되어진다. DCF는 데이터 전송을 위한 무선 채널 접근

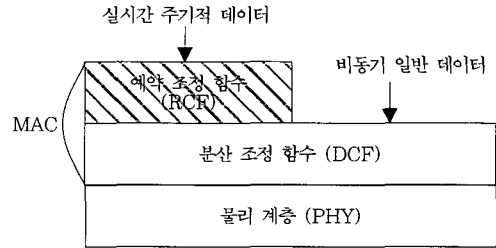


그림 1. 예약 CSMA/CA 구조

시 채널 사용 획득을 위해 다른 노드들과 경쟁하는 경쟁 방식으로 동작한다.

한편, 예약 조정 함수 RCF의 목적은 실시간 주기적 데이터 전송을 위해 슬롯 예약을 수행하는 것이다. 노드는 three-way handshake를 이용하여 동적으로 슬롯 예약을 수행한다. 만약 노드가 실시간 데이터 전송을 위한 슬롯 예약을 성공적으로 완료한다면, 그 노드는 해당 트래픽이 완료될 때까지 동일 영역 안에 있는 다른 노드들과의 어떠한 경쟁도 없이 프레임 주기(frame cycle)에서 동일한 슬롯을 계속 사용할 수 있다. 해당 트래픽이 완료된 후 예약된 슬롯은 자동으로 해제된다.

예약 CSMA/CA에서 실시간 트래픽의 전송은 TDMA 방식과 유사하며, 비동기 트래픽의 전송은 CSMA/CA 방식과 매우 유사하게 동작한다.

### 2.2 예약 조정 함수

예약 조정 함수 RCF는 실시간 데이터 전송 전에 슬롯 예약을 수행하고, 슬롯 예약 시 그림 2와 같이 three-way handshake 방식을 기본으로 이용 한다.

RCF에서 three-way handshake을 사용하는 이유는 이동 애드혹 망에는 숨겨진 단말기(hidden terminal) 문제가 존재하기 때문이다. 만일 이 문제를 고려하지 않으면 심각한 성능 저하를 가져올 것이다. 따라서 슬롯 예약을 위해 송신자와 수신자 사이에서

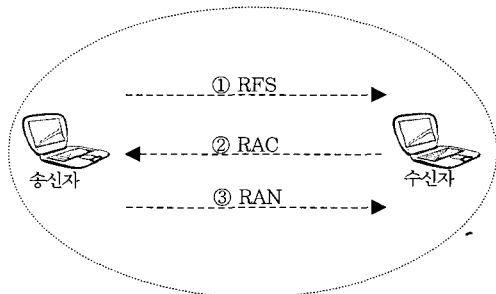


그림 2. Three-way Handshake

제어 프레임을 교환 할 때, three-way handshake 방식으로 교환함으로써, 송신자와 수신자의 전송 영역 (transmission region)에 속해 있는 모든 이웃 노드에게 전송 기간(transmission duration)을 알릴 수 있고, 숨겨진 단말기 문제를 최소화할 수 있다.

RCF에서는 IEEE 802.11의 DCF에서 사용하는 제어 프레임인 RTS(Request to Send) 프레임, CTS(Clear to Send) 프레임 그리고 ACK (Acknowledgment) 프레임 이외에, 슬롯 예약을 수행하기 위한 세 개의 제어 프레임을 추가로 사용한다.

- RFS(Request for Slot Reservation) : 송신자가 슬롯 예약 요청
- RAC(Reservation Acknowledgment) : 수신자가 슬롯 예약 요청에 대해 응답
- RAN(Reservation Announcement) : 송신자가 예약된 슬롯을 주위에 알림

이동 노드(송신자)가 실시간 트래픽(예를 들어, 음성 또는 영상)의 전송을 원할 때, 먼저 수신자에게 RFS 프레임을 전송하여 가능한 슬롯 예약을 요청한다. 만약 수신자에서 RFS가 올바르게 수신되면, 수신자는 슬롯 예약 테이블에서 사용이 가능한 슬롯을 검색한다. 그리고 슬롯이 있다면, 해당 슬롯을 “예약됨(reserved)”으로 기록하고 RAC 프레임으로 송신자에게 응답한다. RAC 프레임은 이 트래픽을 위하여 예약된 슬롯 번호를 송신자에게 알린다. 이 과정에서 RAC 프레임은 수신자의 전송 범위에서 브로드캐스트 됨으로써, 수신자의 이웃 노드들은 각각 자신의 슬롯 예약 테이블을 갱신한다. 송신자는 RAC 프레임이 수신 되면, 자신의 범위에 있는 이웃 노드들에게 슬롯 예약을 알리기 위하여 RAN 프레임을 전송한다. 이 때, 피기백(piggyback)방식으로 RAN 프레임을 첫 번째 데이터 프레임과 함께 전송한다. 이렇게 RAN을 피기백 방식으로 전송하는 이유는 실시간 트래픽이 예약 수행 과정에서 발생 할 수 있는 시작 지연(delay)을 줄이고, 무선 대역폭 사용 효율을 높이기 위해서이다.

2.3 프레임 형식(Frame Format)

아래 표 1 RCF 프레임 형식은 RCF에서 사용하는 추가적인 제어 프레임과 데이터 프레임의 형식을 보여준다. 먼저 RFS 프레임은 IEEE 802.11 DCF에서 사용하는 RTS 프레임의 형식과 동일하다. 다음으로 RAC 프레임은 IEEE 802.11 DCF에서 사용하는 CTS 프레임 형식에 2 바이트 슬롯 번호를 위한

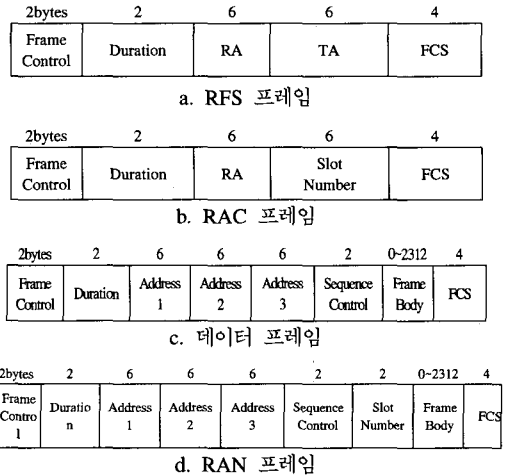


표 1. RCF 프레임 형식

“Slot Number” 필드를 추가하였다.

마지막으로 RAN 프레임은 피기백 방식으로 데이터 프레임에 예약된 슬롯 번호를 알리기 위하여 “Slot Number” 필드를 추가하였다. RAN 프레임은 RFS 프레임과 RAC 프레임 교환 뒤에 한번만 사용되고, 그 뒤 실시간 데이터는 슬롯 예약 테이블에서 예약된 해당 타임 슬롯에서 데이터 프레임 형식으로 전송된다.

2.4 슬롯 예약 테이블(Slot Reservation Table)

각 노드에서 three-way handshake을 이용하여 실시간 데이터를 위한 슬롯 예약을 수행 할 때, 각 노드는 자신의 슬롯 예약 테이블을 관리한다. 이 때, 이 슬롯 예약 테이블을 단순히 슬롯 번호만 관리하는데 그치지 않고 방향성을 주어 송신과 수신으로 구분함으로써 슬롯 사용을 더욱 효율적으로 할 수 있다.

다음의 그림 3 슬롯 예약 방법 사례를 살펴봄으로써 슬롯 예약 수행 시 방향성을 주는 것과 주지 않는 것의 차이를 알 수 있다.

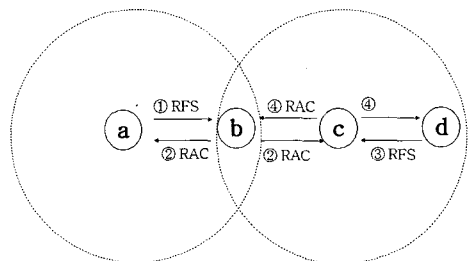


그림 3. 슬롯 예약 방법 사례

먼저 노드 a가 노드 b에게 실시간 데이터 전송을 시작하고 다음으로 노드 d가 노드 c에게 실시간 데이터를 전송하려고 한다.

다음의 표 2와 3은 슬롯 예약 과정이 끝난 후, 테이블 관리에 방향성이 있을 경우와 없을 경우의 슬롯 예약 상황을 각각 보여준다.

• 방향성을 고려하지 않는 경우

노드 \ 슬롯	1	2	3
노드 a			
노드 b			
노드 c			
노드 d			

노드 \ 슬롯	1	2	3
노드 a			
노드 b			
노드 c			
노드 d			

① 노드 a가 RFS 전송 후      ② 노드 b가 RAC 전송 후

노드 \ 슬롯	1	2	3
노드 a			
노드 b			
노드 c			
노드 d			

노드 \ 슬롯	1	2	3
노드 a			
노드 b			
노드 c			
노드 d			

③ 노드 d가 RFS 전송 후      ④ 노드 c가 RAC 전송 후

표 2. 방향성을 고려하지 않은 예약 테이블

슬롯 예약 테이블이 비어 있는 상태에서, 노드 a가 실시간 데이터 전송을 위해 노드 b로 RFS 프레임 전송 하고, 노드 b는 1번 슬롯을 예약한 뒤에 RAC 프레임으로 노드 a에게 예약된 1번 슬롯을 알린다. 또한 이 때에 노드 b의 영역에 존재하는 이웃 노드 c도 브로드캐스트로 RAC 프레임을 수신하고 1번 슬롯을 예약한다. 따라서 노드 a, b, c 모두 1번 슬롯을 예약하였다.

다음으로 노드 d가 노드 c에게 RFS 프레임으로 슬롯 예약을 요청하고, 노드 c는 비어있는 2번 슬롯을 예약한 후 RAC 프레임으로 노드 d에게 응답한다. 또한 이 때, 노드 c에 이웃한 노드 b도 RAC 프레임을 수신함으로써 슬롯 2번을 예약한다. 따라서 그림 3의 시나리오를 수행하기 위해서 방향성을 고려하지 않은 경우 노드 b와 c에서 소비되는 타임 슬롯은 두 개다.

• 방향성을 고려한 경우

노드 a가 노드 b에게 RFS 프레임 보내 슬롯 예약을 노드 b에게 요청하면, 노드 b는 자신의 슬롯 예약 테이블에서 사용 가능한 1번 슬롯을 예약한다. 이 때 송신과 수신을 동시에 할 수 없으므로 노드 b는 송신과 수신 테이블 모두 예약을 수행한다. 다음으로 노드 b는 예약된 슬롯 번호 1번을 가진 RAC 프레임으로 노드 a에게 슬롯 예약을 알린다. RAC

노드 \ 슬롯	1	2	3	1	2	3
노드 a						
노드 b						
노드 c						
노드 d						

노드 \ 슬롯	1	2	3	1	2	3
노드 a						
노드 b						
노드 c						
노드 d						

① 노드 a가 RFS 전송 후      ② 노드 b가 RAC 전송 후

노드 \ 슬롯	1	2	3	1	2	3
노드 a						
노드 b						
노드 c						
노드 d						

노드 \ 슬롯	1	2	3	1	2	3
노드 a						
노드 b						
노드 c						
노드 d						

③ 노드 d가 RFS 전송 후      ④ 노드 c가 RAC 전송 후

표 3. 방향성 고려 예약 테이블

프레임을 수신한 노드 a는 마찬가지로 송신과 수신을 동시에 할 수 없으므로 송신과 수신 테이블 모두 예약을 수행한다. 하지만 노드 a에 이웃한 노드 c의 경우 노드 a의 수신을 방해하지 않기 위해 송신만 예약을 받고 수신은 가능한 상황이다. 따라서 수신 테이블의 슬롯만을 예약한다.

다음으로 노드 d가 노드 c에게 RFS 프레임으로 슬롯 예약을 요청하고, 노드 c는 수신 테이블에서 비어있는 슬롯을 검색한 후 1번 슬롯을 예약한다. 그리고 슬롯 번호 1번을 가진 RAC 프레임으로 노드 d에게 응답한다. 노드 d는 송신과 수신 테이블 모두 예약을 수행한다. 이 때, 노드 c에 이웃한 노드 b도 RAC 프레임을 수신함으로써 슬롯 1번을 예약한다. 따라서 방향성을 고려한 경우 그림 3의 시나리오를 수행하기 위해서 노드 b와 c에서 소비되는 타임 슬롯은 한 개이다.

Ⅲ. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 환경

시뮬레이션 수행의 목적은 이동 애드혹 망에서 멀티 미디어 데이터 전송을 위한 예약 CSMA/CA 프로토콜을 평가하는 것이다. 비동기 데이터 전송을 위한 DCF 성능 평가는 여러 논문에서 폭넓게 연구되었다<sup>7,8)</sup>. 따라서 본 논문에서는 이동 애드혹 망에서 실시간 주기적 데이터 전송에 초점을 맞추었다.

사용된 시뮬레이션 프로그램은 소프트웨어 방식으로 CMU Monarch 프로젝트<sup>9)</sup>로 만들어진 cmu-extendedns-1.1.2와 ad-hockey를 사용하였다. 이 소프트웨어 시뮬레이터는 ns-2 Network Simulator<sup>10)</sup>의 확장된 버전으로 무선 네트워크 상에서 무선 인터페이스

표 4. 시뮬레이션 매개 변수(Parameter) 값

Parameter	Value
Frame cycle	20 ms
Channel bit rate	2 Mbps
SIFS	10 us
RIFS	30 us
DIFS	50 us
TDMA slot length	0.8 ms
Backoff slot length	20 us
Propagation delay	100 us

이므로 연결된 이동 노드들을 정확히 시뮬레이션 할 수 있다.

본 논문에서는 제안된 예약 CSMA/CA 프로토콜을 애드혹 망에서 사용이 가능한 IEEE 802.11 표준 DCF의 성능과 비교하였다. IEEE 802.11 표준 DCF MAC 프로토콜은 확장 ns-2에 구현되어 있는 부분을 사용하였고, 예약 CSMA/CA 프로토콜은 확장 ns-2 위에서 직접 구현하였다.

실시간 트래픽은 CBR(Constant-Bit-Rate) 트래픽을 사용하였다. CBR 패킷의 유효부하(payload)는 512bits 이다. 시뮬레이션을 위해 사용된 주요 매개 변수는 표 4와 같다.

셀룰러(cellular) 환경에서 전송 범위(transmission range)의 반경이 약 20 마일로 가정될 때, 최대 전파 지연(propagation delay)은 약 100 us가 된다. 이것은 이동 애드혹 망에서도 상당히 현실적이다. RIFS 값은 SIFS와 DIFS의 중간 값으로 30us를 사용하였다. 백오프(backoff) 슬롯은 TDMA 슬롯과 다르다. 이것은 단지 충돌과 관련된 이동 노드들을 위한 임의의 백오프 시간을 결정하는 것에만 사용된다.

### 3.2 시뮬레이션 결과

앞서 언급한 시뮬레이션 환경과 주어진 시뮬레이션 매개 변수를 가지고 수행한 시뮬레이션의 결과는 다음의 그림 4와 5에서 나타난다.

먼저 그림 4 평균 지연(average delay)을 보면, 시뮬레이션 초기에는 IEEE 802.11 표준 MAC 방식이 예약 CSMA/CA 보다 더 낮은 평균 지연 값을 가진다. 그러나 일정 트래픽(0.3) 이상의 부하(load)에서는 IEEE 802.11 표준은 평균 지연이 크게 상승하지만 예약 CSMA/CA는 상승폭이 거의 없음을 알 수 있다.

이는 802.11 표준의 경우, CSMA/CA 프로토콜의 특성상 부하가 적은 상태에서는 노드가 전송하려는 패킷이 도착하자마자 즉시 패킷을 전송할 수 있기 때문에 MAC 지연이 비교적 낮은 값을 가지게 된다.

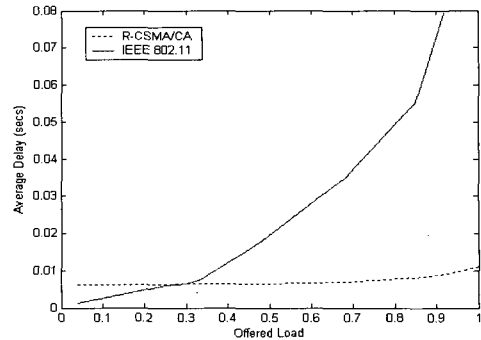


그림 4. 평균 지연(Delay)

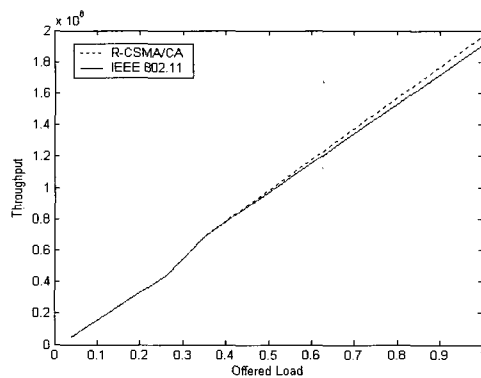


그림 5. 처리율(Throughput)

그러나 부하가 증가하면서 충돌(collision) 확률도 또한 같이 증가하게 되고, 대부분의 전송시간은 충돌로 끝나게 된다. 그러므로 노드가 하나의 패킷을 전송하기 위해서는 여러 번의 전송 시도가 필요하게 되고 이는 MAC 지연의 상승으로 이어진다.

예약 CSMA/CA의 경우 일정한 프레임 주기를 가지고 동작하므로 트래픽이 거의 없을 때에도 일정한 지연을 가지게 되지만, 트래픽이 많을 때에도 노드들이 자신의 예약된 TDMA 슬롯을 가지고 통신을 함으로써 IEEE 802.11 표준 MAC 방식과 달리 트래픽에 의한 영향을 크게 받지 않는다는 것을 의미한다.

그림 5 처리율(throughput)을 보면, 부하가 높아질수록 예약 CSMA/CA가 IEEE 802.11 표준 MAC 보다 조금 더 높은 처리율을 가진다.

이것은 IEEE 802.11 표준 MAC 방식의 경우 부하가 높아질수록 채널 사용을 위한 경쟁으로 대역폭 낭비가 발생하지만, 예약 CSMA/CA 방식의 경우 일단 슬롯 예약이 완료된 후에는 IEEE 802.11 표준과 달리 경쟁으로 인한 대역폭의 낭비가 거의 없기 때문에 예약 CSMA/CA가 더 높은 처리율을 가진다는 것을 보여준다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 이동 애드혹 망에서 멀티미디어 데이터 전송을 지원하기 위한 새로운 MAC 프로토콜인 예약 CSMA/CA를 설계하고 그 성능에 대하여 논하였다.

제안한 프로토콜의 주요 개념은 실시간 트래픽 전송을 효율적으로 지원하기 위하여 기본적인 접근 방법인 CSMA/CA 위에 예약 기법을 구현하는 것이다. 슬롯 예약은 숨겨진 단말기(hidden terminal) 문제를 줄이기 위하여 송신자와 수신자 간에 제어 패킷을 three-way handshake 방식으로 교환함으로써 이루어진다. 또한 타임 슬롯 사용의 효율성을 높이는 방법으로 타임 슬롯 예약 시 방향성을 고려하였다. 방향성을 고려한 슬롯 예약은 예약 테이블에서 타임 슬롯을 송신과 수신으로 나누어서 예약하는 방법을 사용하였다. 만약 노드의 이동이 많이 발생하고 토폴로지의 변화가 심하면, 예약에 따른 부하(overhead)를 줄이기 위해 예약 조정 함수는 종료되고 오직 경쟁 방식인 CSMA/CA 만으로 동작한다.

제안한 프로토콜의 시뮬레이션은 ns-2 시뮬레이터를 사용하여 수행하였다. 그 결과, 실시간 주기적 데이터 전송을 위해 IEEE 802.11 표준과 비교하여 예약 CSMA/CA가 결정적(deterministic) 지연이 제공되는 한 더 높은 처리율(throughput)을 제공한다는 사실을 보여주었다.

#### 참고 문헌

[1] IEEE 802.11 Working Group, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," *IEEE 802.11 Standards*, 1999.

[2] S. Xu and T. Saadawi, "Does IEEE 802.11 MAC Protocol Work Well in Multi-hop Wireless Ad Hoc Networks?," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 39, No. 6, pp. 130-137, June 2001.

[3] S. Mangold et al., "IEEE 802.11e Wireless LAN for Quality of Service," *Proceedings of European Wireless*, February 2002.

[4] D.J. Goodman et al., "Packet Reservation Multiple Access for Local Wireless Communications," *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 37, No. 8, pp. 885-890, August 1989.

[5] S. Ramanathan and E.L. Lloyd, "Scheduling Algorithms for Multihop Radio Networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 1, No. 2, pp. 166-177, April 1993.

[6] C. Zhu and M.S. Corson, "A Five-Phase Reservation Protocol (FPRP) for Mobile Ad-hoc Networks," *Proceedings of IEEE INFOCOM*, March 1998.

[7] H.S. Chhaya and S. Gupta, "Performance of Asynchronous Data Transfer Methods of IEEE 802.11 MAC Protocol," *IEEE Personal Communications Magazine*, pp. 8-15, October 1996.

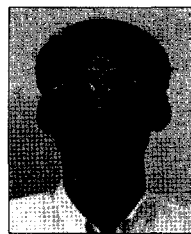
[8] B.P. Crow et al., "IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks," *IEEE Communications Magazine*, pp. 116-126, September 1997.

[9] <http://www.monarch.cs.rice.edu>.

[10] <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.

#### 조인휘 (Inwhae Joe)

정회원



1983년 2월 한양대학교 전자공학과 졸업  
 1994년 12월 미국 University of Arizona, Electrical and Computer Engineering, M.S.  
 1998년 9월 미국 Georgia Tech, Electrical and Computer Engineering, Ph.D.

1992년 12월 (주) 테이콤 종합연구소 선임연구원  
 2000년 6월 미국 Oak Ridge 국립연구소 연구원  
 2002년 8월 미국 Bellcore Lab (Telcordia) 연구원  
 2002년 9월~현재 한양대학교 정보통신학부 부교수 <관심분야> Mobile Internet, Cellular System and PCS, RFID/USN, Mobility Management