

차세대 무선랜을 위한 Carrier Sensing Multiple Access with Collision Resolution (CSMA/CR) 프로토콜

최 현 호*

Carrier Sensing Multiple Access with Collision Resolution (CSMA/CR) Protocol for Next-Generation Wireless LAN

Hyun-Ho Choi*

요 약

본 논문에서는 차세대 무선랜 환경으로 고밀도 fully-connected single hop 네트워크 구조를 고려하여 CSMA/CR이라 불리는 분산 MAC 프로토콜을 제안한다. 제안방안은 CSMA/CA 방식을 준수하여 기존 MAC 프로토콜과 호환성을 보장하며, CSMA/CD의 충돌 검출 방식을 무선 상황에 맞게 도입하여 RTS/CTS 사용 없이도 빠른 시간 내에 충돌을 검출할 수 있다. 또한 충돌이 검출되면 다음 전송 시에는 자원을 전용으로 할당하여 추가적으로 발생 가능한 충돌을 해결한다. 아울러 제안 CSMA/CR의 실용화를 위한 구현 이슈를 살펴보고, 대표적인 분산 무선 MAC 프로토콜과 성능 비교를 수행한다. 시뮬레이션 결과 제안하는 CSMA/CR은 RTS/CTS 사용 없이 충돌을 발견할 수 있어 오버헤드가 적으며, 충돌 발생 시에는 다음번 전송에 대해서는 예약방식으로 충돌을 없애줌으로써 접속 노드 수에 상관없이 항상 가장 좋은 전송효율을 보여준다.

Key Words : CSMA, collision avoidance, collision detection, collision resolution, 충돌회피, 충돌검출, 충돌해결

ABSTRACT

This paper proposes a distributed MAC protocol called Carrier Sensing Multiple Access with Collision Resolution (CSMA/CR) considering fully-connected single hop network environments for next-generation wireless LAN with high density of stations. The proposed CSMA/CR is compatible with the conventional MAC protocols by observing the operation of CSMA/CA and is able to detect a collision promptly without RTS/CTS exchange by applying the technique of CSMA/CD to wireless environments. Moreover, once a collision is detected, the dedicated resource is allocated to the next transmission and so the collision that may occur again is resolved. We investigate some implementation issues for the practicality of CSMA/CR and compare it with the typical distributed MAC protocols. The simulation results show that the proposed CSMA/CR has a low overhead as detecting a collision without the RTS/CTS exploitation and achieves always the best throughput regardless of the number of access stations, by using the reservation-based collision resolution technique.

I. 서 론

세계 이동통신 연구 포럼인 WWRF(World Wide

Radio Forum)는 2017년에 70억 세계 인구가 7조개의 무선 통신 기기를 소유할 것이라고 비전을 제시하였다^[1]. 이는 한 사람당 약 천여 개의 무선 통신

※이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0025424)

• 국립한경대학교 전기전자제어공학과, hhchoi@hknu.ac.kr, 정희원

논문번호 : KICS2012-09-423, 접수일자 : 2012년 9월 6일, 최종논문접수일자 : 2012년 12월 5일

기기를 사용하는 규모로, 미래에는 인간의 모든 생활공간에 존재하는 다양한 사물들이 무선 통신 기능을 가질 것으로 예상된다. 수많은 단말에게 무선 통신 및 네트워킹 기능을 제공하기 위해서는 현재 이동 통신 서비스와 같은 중앙 집중형 셀룰러 시스템 보다는 무선랜(Wireless Local Area Network; WLAN)이나 WPAN(Wireless Personal Area Network)과 같이 인프라 없이 운용되는 자율 분산형 시스템이 더 적합하다. 왜냐하면 셀룰러 시스템은 주파수 대역폭, 시스템 용량, 가용 주소수의 부족과 단말 구현, 관리, 접속 비용의 증가로 인해 대규모 단말을 지원하기에 적합하지 않은 반면, 무선랜과 같은 분산 시스템은 광대역의 비인가 대역(licensed band)을 사용하고 인프라 구축비용 없이 네트워킹이 가능하므로 전송 용량 및 비용 측면에서 대규모의 단말을 지원하기에 유리하다. 따라서 미래의 대규모 단말을 지원하는 통신 환경은 인프라 없이 단말 스스로 네트워크를 구성하고 통신하는 분산 네트워크 환경이 될 것으로 예상된다.

분산 네트워크의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 주어진 채널 자원을 단말간 형평성(fairness)을 보장하면서 어떻게 효율적으로 나눠 사용할지를 결정하는 매체 접속 제어(Medium Access Control; MAC) 방식이다. 대표적인 분산 MAC 방식은 CSMA/CA(Carrier Sensing Multiple Access with Collision Avoidance)로 그 동작이 간단하여 널리 사용되고 있다²⁾. CSMA/CA는 채널이 비어 있을 때 전송을 시도하는데, 여러 단말이 동시에 접속하면 충돌(collision)이 발생하여 전송 자원이 낭비된다. 충돌 시에는 백오프 윈도우(backoff window)를 두 배로 증가시키고 증가된 백오프 윈도우 내에서 무작위로 선택된 백오프 시간동안 기다린 후 재접속을 시도한다. 이러한 방식은 경쟁 단말의 수가 적을 때는 충돌 없이 잘 동작하지만, 단말 수가 증가함에 따라 재시도하는 단말의 반복적인 충돌로 채널 효율이 급격히 감소한다. 이러한 충돌 문제를 극복하기 위해 실제 데이터 전송에 앞서 RTS(Ready-to-Send)와 CTS(Clear-to-Send) 제어 패킷을 송수신 단말간에 교환하여 채널을 예약하고 사용하는 4-way-handshake CSMA/CA가 제안되었다³⁾. RTS와 CTS의 길이는 데이터 프레임에 비해 짧으므로 충돌시 낭비되는 시간 자원이 줄어든다. 아울러 RTS와 CTS의 교환은 데이터 전송을 사전에 주변 노드에게 알리는 효과가 있어 은닉 노드 문제(hidden node problem)와 노출 노드 문제

(exposed node problem)를 해결할 수도 있다. IEEE 802.11에서는 이러한 CSMA/CA 방식을 채택하여 DCF(Distributed Coordinated Function)로 정의하고 있다⁴⁾. DCF는 기본(default)으로 CSMA/CA 방식을 따르며, 전송 데이터 길이가 임계치보다 큰 경우에는 선택적(optional)으로 RTS/CTS 기능을 사용한다. 기본적으로 두 방식의 성능은 접속 노드 밀도에 따라 상충관계(tradeoff)를 갖는데, 단말 수가 적은 저밀도 환경에서는 충돌 확률이 낮아 RTS/CTS의 전송이 오버헤드가 되어 기본 CSMA/CA 방식이 더 좋은 성능을 보이는 반면, 단말 수가 많은 고밀도 환경에서는 충돌로 인한 긴 데이터 전송시간 낭비를 사전에 RTS/CTS 전송으로 막을 수 있어 RTS/CTS 방식이 더 좋은 성능을 갖는다.

실제 상용 무선랜 환경에서는 RTS/CTS 옵션이 드물게 사용되는데, 이는 RTS/CTS 전송 시간이 데이터 전송률이 높은 경우에는 무시할만하지 않기 때문이다^{5,6)}. 또한, 무선랜이 주로 사용되는 환경이 벽으로 차단된 실내이거나 가시거리 내의 직접 통신이고, 인접 셀 간에는 비중첩(orthogonal) 채널을 할당하여 사용하기 때문에 실제로 은닉 및 노출 노드 문제가 발생할 확률이 적어 RTS/CTS의 필요성이 떨어진다⁷⁾. 아울러, 하나의 무선랜으로 one-hop coverage를 제공하고자 TVWS(TV white space)를 사용하는 IEEE 802.11af와 900MHz 대역을 활용하는 IEEE 802.11ah 표준이 제정 중에 있다^{8,9)}. 이와 같은 맥락에서 미래 무선랜 환경은 존재하는 모든 단말이 단일 홉 거리 내에서 서로 직접 연결 가능한 fully connected single-hop 네트워크 구조를 가질 거라 예상된다.

본 논문에서는 fully connected single-hop 네트워크 환경을 고려한 분산 MAC 프로토콜을 다룬다. 제안방안은 CSMA/CA 방식을 준수하여 기존 MAC 방식과의 호환성을 보장한다. 또한 유선 이더넷(Ethernet)의 MAC 방식인 CSMA/CD(Collision Detection)에서 사용하는 충돌 검출 방식을 무선 상황에 적용하여 RTS/CTS 사용 없이 빠른 시간 내에 충돌을 검출한다. 아울러, 충돌이 검출될 경우에는 하나의 충돌 단말에게 다음번 전송에 대해 자원을 전용으로 할당해줌으로써 지속적으로 발생할 수 있는 충돌을 해결(resolution)한다. 이와 같이 충돌을 해결하는 제안방안의 특징을 기반으로 우리는 제안 MAC 프로토콜을 CSMA/CR (Collision Resolution)이라 명명한다.

논문의 나머지는 다음과 같이 구성된다. 2장에서

는 관련 기술로 CSMA/CD 프로토콜과 이를 무선 환경에 적용시킨 Wireless CSMA/CD(WCSMA/CD) 프로토콜에 대해서 자세히 기술한다. 3장에서는 제안하는 CSMA/CR의 동작을 구체적으로 설명하고, 4장에서 제안 프로토콜에 관한 구현 이슈에 대해 논의한다. 5장에서는 시뮬레이션 결과를 보여주고 6장에서 본 논문에 대한 결론을 맺는다.

II. 기존 연구

CSMA/CD는 CSMA 동작을 수행 하면서(즉, 채널을 센싱하고 비어있을 때 접속 시도) 충돌 발생 시에는 이를 빠르게 검출하여 전송을 중단하고 자원 낭비를 막는다^[10]. 이를 위해 송신 단말은 데이터를 전송하면서도 송신 신호와 수신 신호를 비교함으로써 매체상의 충돌 여부를 감지한다. 충돌은 정상적인 데이터 송수신시 적용되는 전압 레벨보다 훨씬 높은 레벨이 검출될 때 인지된다. 충돌이 감지되면 이를 발견한 단말은 전송을 중지하고 짧은 jam 신호를 전송하여 충돌 발생을 모든 단말에게 알린다. Jam 신호는 32~48 비트의 길이를 갖는 약속된 특수 프레임이다. Jam 신호 전송 후 해당 모든 충돌 단말들은 랜덤 백오프 후에 재전송을 시작한다. 이와 같이 CSMA/CD는 충돌 발생 여부를 데이터 전송 중에 알 수 있어 채널 사용효율이 CSMA/CA 보다 좋다고 알려져 있다. 하지만 이와 같은 충돌 검출 기능은 전송 단말이 송수신을 동시에 수행할 수 있는 유선 환경에서만 가능한 것으로, 무선 환경에서는 송신 단말의 수신기가 자신의 전송 파워에 의해 압도되어(deaf problem이라 불림) 전송 중에 채널을 센싱하는 것이 불가능하기 때문에 CSMA/CD 기능을 그대로 사용할 수 없다. 하지만 이와 같은 무선에서의 원천적인 문제점에도 불구하고 CSMA/CD의 충돌 검출 기능을 무선에 적용하려는 시도가 있어왔다.

CSMA-TCD(Timesplit Collision Detection) 프로토콜은 고정 길이의 프리앰블을 전송한 후에 바로 데이터를 연달아 전송하지 않고 잠시 전송을 멈추고 일정 시간 동안 carrier 센싱을 수행한다^[11]. 동시에 프리앰블을 전송한 단말들은 전송 지연에 의해 센싱 기간 동안 프리앰블의 전송이 있음을 인지할 수 있어 충돌을 데이터 전송 전에 감지할 수 있다. 하지만 이 프로토콜은 긴 지연이 발생하는 환경에 특화된 것으로 좁은 영역에서 동작하는 무선랜 환경에서는 현실적인 동작이 어렵다. 상대적으로 짧은

지연 상황에서 Multitone Tree Search라고 불리는 충돌 해소 방식을 CSMA-TCD에 추가하였는데 이 방식은 본질적으로 트래픽 로드의 증가에 따라 높은 복잡도를 야기한다^[12].

WCSMA/CD 프로토콜은 CSMA-TCD를 확장하여 fully connected single-hop 네트워크 환경에서 더 나은 충돌 검출 기능을 제공한다^[13]. WCSMA/CD는 데이터 전송 시작 후 일정 CD period(CDP) 동안 짧은 CD slot(CDS)을 할당하고, 이 CDS 시간 동안 전송을 멈추고 다른 전송 신호가 있는지 carrier 센싱을 수행한다. 이때 CDP 내에서 CDS의 위치는 랜덤하게 결정되므로 다른 동시 전송 단말의 CDS와 겹치지 않는다면 충돌 검출이 가능하다. 만약 CDS에서 다른 사용자의 전송이 확인되면 (즉, 충돌이 검출되면) CDP 동안만 데이터를 전송하고, 이후에는 전송을 중단하고 백오프 후 다시 접속을 시도한다. 반대로 CDS에서 다른 사용자의 전송이 없음을 확인하면 이후 전송을 계속하여 전송에 성공한다. 그림 1은 이러한 WCSMA/CD의 동작 예를 보여준다. 아울러 [14]에서는 멀티캐스트 서비스에 WCSMA/CD를 적용하였고, [15]에서는 수학적 분석을 통해 WCSMA/CD의 성능을 도출하고 전송효율을 최대화 하는 최적 CDP를 제시하였다.

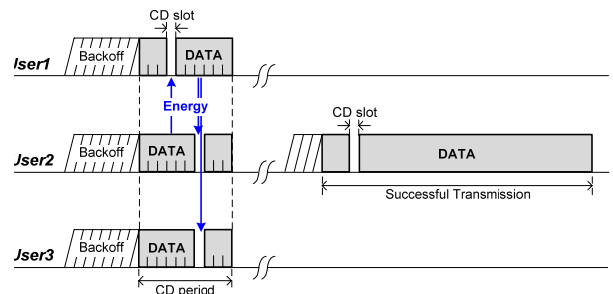


그림 1. WCSMA/CD의 동작
Fig. 1. Operation of WCSMA/CD

분산 로봇 간 통신하는 환경에서 각 로봇이 전송하는 메시지의 길이가 모두 다르며 고정되어 있다는 가정 하에 CSMA/CD-W(Wireless) 프로토콜이 제안되었다^[16]. 이러한 가정에서는 다수의 송신 단말이 동시에 데이터를 전송할 경우 서로 끝나는 시간이 다르므로, 수신 단말이 데이터 수신 완료 후 바로 carrier 센싱을 해보면 충돌이 있었음을 예상할 수 있다. 이후 충돌을 감지한 단말은 collision report 메시지를 방송함으로써 충돌을 주변 단말에

게 알린다. 또한, CSMA/CD-R(Reservation)은 CSMA/CD-W를 확장하여 충돌이 발행한 경우 전송 데이터의 길이가 다른 점을 이용하여 다음번 전송 자원을 데이터 길이 순서대로 예약하여 충돌 없이 전송할 수 있게 하였다¹⁷⁾. 하지만 이러한 방법들은 모든 단말의 전송 패킷의 길이가 서로 다른 경우에만 동작하여 일반적인 통신 환경에서는 사용이 어렵다.

이와 같이 무선 환경에서 충돌 검출 기능을 구현하기 위해서는 전송 중인 단말이 전송을 잠시 멈추고 해당 채널을 센싱하여 다른 단말의 동시 전송이 있는지 없는지를 살펴야 한다. 이와 같은 동작은 충돌 검출의 신뢰성을 높이기 위해서 은닉(hidden) 단말이 없는 fully connected single-hop 네트워크 환경을 전제로 한다. 따라서 fully connected single-hop 네트워크에서는 무선에서도 CSMA/CD와 같은 충돌 검출 기능을 사용할 수 있으며, 이는 기존 CSMA/CA 방식과 비교하여 복잡도를 증가시키지만 채널의 전송효율을 향상 시킬 수 있는 기회를 제공한다.

III. 성능 분석

제안 CSMA/CR 프로토콜은 CSMA/CA의 채널 접속 방식 및 충돌 발생 시의 binary exponential 백오프(backoff) 알고리즘을 그대로 따른다. 또한 WCSMA/CD의 충돌 검출 방식을 적용하여 송신단은 데이터 전송 시작 후 일정 기간 내에 랜덤 슬롯을 할당하여 전송을 멈추고 채널을 센싱하여 다른 전송과의 충돌 유무를 확인한다. 아울러 CSMA/CD 프로토콜과 같이 충돌 발생시 가장 먼저 충돌을 검출한 단말이 jam 신호를 전송한다. Jam 신호는 사전에 약속된 신호 패턴으로, 채널 센싱시 jam 신호를 인식한 단말은 진행 중이던 전송을 바로 멈춘다. 반면 jam 신호를 일정 기간 동안 전송한 단말은 충돌 이후 백오프 절차 없이 바로 이어서 전송을 계속할 수 있도록 채널사용 우선권을 가짐으로써 해당 전송에 대해서는 충돌 없이 전송을 완료 할 수 있게 해준다. 이는 기존 CSMA 기반 프로토콜과는 다른 제안 방식만의 독특한 충돌 해결 방식으로 충돌이 검출되면 모든 단말이 다시 백오프하지 않고 한 단말의 다음번 전송에 대해서는 성공을 보장해 준다.

3.1. CSMA/CR의 동작

그림 2는 충돌이 없을 때 기본적인 CSMA/CR의 동작을 보여준다. 먼저 랜덤 백오프 수행 후 채널이 사용 중이지 않으면 데이터 전송을 시작하고, 약속된 일정 CR period(CRP) 내에서 랜덤하게 CR slot(CRS)을 할당하여 충돌 여부를 살핀다. 그림 2의 경우 에너지 및 jam 신호가 둘 다 검출되지 않으므로 데이터 전송을 계속하고 수신단으로부터 ACK(acknowledgement) 프레임을 수신할 수 있다. 여기에서 CRP의 길이는 충돌 발생 정도에 따라 결정되는 제어 파라미터로 모든 단말이 동일한 값으로 설정한다. CRS의 길이는 다른 단말이 도중에 끼어들지 못하도록 DIFS(DCF interframe space) 길이 보다는 짧아야 하며, Tx/Rx 및 Rx/Tx 전환 시간과 jam 신호를 검출하는데 걸리는 시간의 합보다는 길어야 하므로 실제로는 구현 성능에 따라 결정된다. 또한, CRP 중 첫 번째 슬롯에서는 프리앰블(preamble)을 전송하고 선택된 CRS 번호를 알려주어 수신단에서 동기화(synchronization)와 데이터 무결성(data integrity)에 문제가 발생하지 않도록 한다.

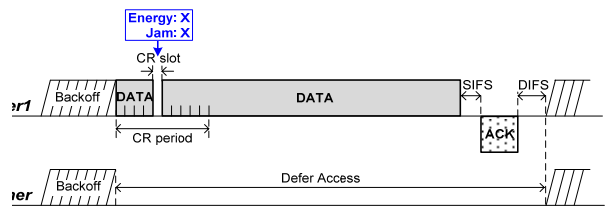


그림 2. 충돌이 발생하지 않을 때 기본 CSMA/CR의 동작
Fig. 2. Basic operation of CSMA/CR when no collision occurs

그림 3은 두 개 이상의 단말이 동시에 접속하여 충돌이 발생한 경우 전송에 성공하는 경우의 CSMA/CR 동작을 보여준다. 전송 단말은 CRP 내에서 CRS를 랜덤하게 할당하고 채널을 센싱하는데, 가장 앞선 CRS를 선택한 단말의 경우 에너지는 검출되지만 jam 신호는 검출되지 않는다. 따라서 이 단말이 가장 먼저 충돌을 감지한 셈이므로 이후 나머지 CRP 동안에는 데이터 대신 jam 신호를 방송한다. 반면, 할당된 CRS가 이보다는 뒤에 있는 다른 단말들은 채널 센싱 결과 jam 신호가 검출되므로 충돌 발생을 인지하고 더 이상 데이터 전송을 하지 않는다. 이때 CRP가 끝나면 jam 신호를 전송한 단말은 채널사용 우선권을 갖고 백오프 과정 없이 바로 데이터를 재전송하며, 다른 단말들은 백오프 윈도우를 증가시키면서 자동적으로 채널 접속이 미뤄진다.

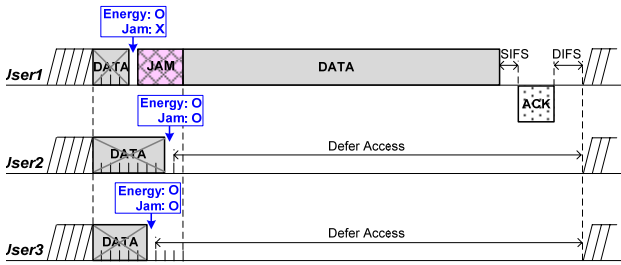
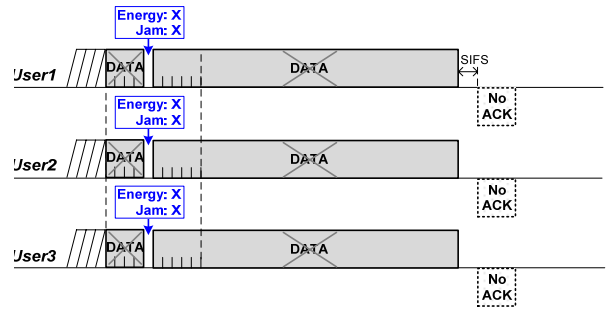
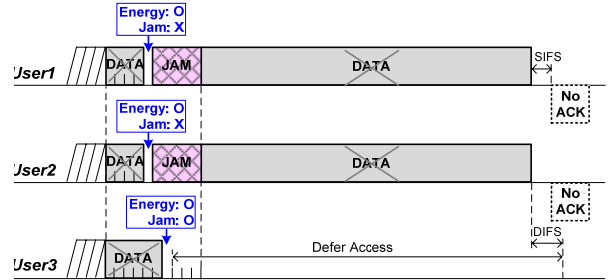


그림 3. 충돌 발생 후 전송에 성공하는 경우 CSMA/CR의 동작
Fig. 3. Operation of CSMA/CR when a transmission is successful after collision occurs

그림 4는 충돌이 발생하였지만 이를 검출하지 못하여 전송에 실패하는 두 가지 경우를 보여준다. 첫 번째 경우는 동시 접속한 단말들이 모두 같은 CRS 번호를 선택한 경우로 다 같이 에너지가 검출되지 않으므로 모든 단말이 데이터를 연이어 계속 전송하게 되어 결국 전송 실패로 이어진다. 두 번째 경우는 가장 작은 CRS 번호를 선택한 단말이 두 개 이상인 경우로 해당 단말들은 jam 신호 전송 후에 모두 데이터를 재전송하므로 전송 실패로 이어진다. 이 경우 그림 4-(b)에서 User 3은 User 1과 2로부터 두 개의 jam 신호가 겹쳐져서 들어오는데 일반적으로 겹쳐진 특정 패턴의 신호는 인식 가능하므로 User 3은 jam 신호를 인식하고 전송을 중지하게 된다. 하지만 만약 User 3이 합쳐진 jam 신호의 인식에 실패한다면 User 3도 나머지 CRP 동안 jam 신호를 전송하고 데이터를 연이어 전송하게 되므로 다른 단말과 똑같이 전송 실패로 이어진다. 참고로 그림 4에서 보듯 두 번째 경우에는 CRP 만료 후에 데이터를 처음부터 다시 전송하므로 전송 실패로 인한 자원 낭비가 첫 번째 경우보다 큼을 알 수 있다. 이와 같이 CRP 동안 충돌을 검출하지 못해 전송에 실패하는 경우 송신단은 수신단으로부터 ACK를 받지 못하게 되므로 전송 실패로 판단하고 백오프 후에 다시 시도하게 된다.



(a) Case I

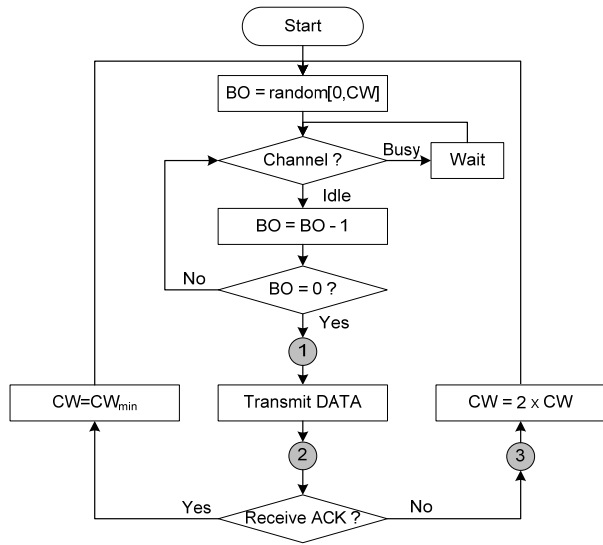


(b) Case II

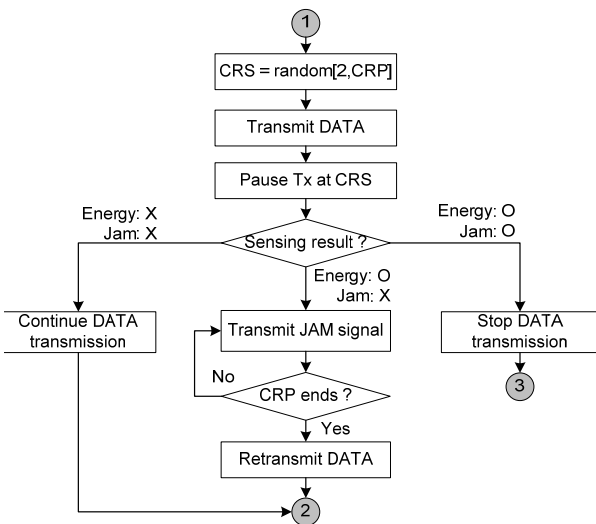
그림 4. 충돌 발생시 충돌 검출에 실패하고 전송에 실패하는 두 경우
Fig. 4. Two cases that transmissions are failed when collision occurs and is not detected

3.2. CSMA/CR의 순서도

그림 5는 CSMA/CR의 동작 순서도를 보여준다. CSMA/CR은 기존 CSMA/CA 프로토콜과 호환되므로 CSMA/CA의 순서도에 CSMA/CR만의 고유한 동작이 추가된 형태로 표현 가능하다. 이러한 추가 동작은 송신단에만 해당되며 수신단의 동작에는 변경사항이 없다. 기존 CSMA/CA의 경우 결정된 BO(backoff) 값만큼 기다린 후 데이터를 전송하고 ACK를 기다렸지만, 제안 CSMA/CR의 경우 CRP(CR period)의 두 번째 슬롯부터 CRP 내에서 CRS(CR slot) 위치를 랜덤하게 결정하고, 데이터를 전송 시작 후 결정한 CRS에서 전송을 멈추고 다시 한 번 채널을 센싱한다. 센싱 결과 energy와 jam이 둘 다 검출되지 않은 경우 나머지 데이터 전송을 계속 하고, energy만 검출된 경우 jam 신호를 전송하고, energy와 jam이 둘 다 검출된 경우 데이터 전송을 중단한다. 이때 jam 신호를 전송한 경우에는 CRP 종료 후 해당 데이터를 백오프 없이 처음부터 다시 전송하는데, 이는 기존 CSMA 기반의 프로토콜과는 차별화 되는 제안 방식만의 충돌 해결 방식에 해당된다.



(a) Operation of CSMA/CA



(b) Operation of CSMA/CR

그림 5. CSMA/CR의 동작 순서도
Fig. 5. Flow chart of CSMA/CR

IV. 구현 이슈

CSMA/CR의 실용화를 위해 고려해야 할 구현 이슈에 대하여 논의한다. 첫째로, 신뢰성 있는 jam 신호 검출을 위한 CRS 길이의 결정이 필요하다. IEEE 802.11 표준에서는 채널의 사용유무를 판단하기 위해 CCA(Clear Channel Assessment)를 규정하고 있다. CCA는 임계치 이상의 에너지 레벨 또는 CS(carrier sense)에 의한 carrier의 존재 유무 또는 이 두 조건이 모두 만족될 때 채널이 사용 중이라고 판단하는데, 여기에서 CS는 물리계층(PHY)에서 사용하는 프리앰블이나 DSSS(Direct Sequence

Spread Spectrum) 신호와 같은 특정 패턴이 존재하는지 확인한다. 또한 802.11 표준은 요구되는 CCA 시간(aCCATime)을 제시하고 이 시간 값을 고려하여 채널을 센싱하고 접속하는데 기본 단위가 되는 SlotTime을 다음과 같이 정의하고 있다.

$$aSlotTime = aCCATime + aRxTxTurnaroundTime + aAirPropagationTime + aMACProcessingDelay \quad (1)$$

여기에서 aRxTxTurnaroundTime은 PHY 계층이 수신에서 송신으로 변환하는데 필요한 최대 시간이며, aAirPropagationTime은 노드간 거리에 따른 최대 전파시간이며, aMACProcessingDelay는 MAC 계층에서 PHY 계층으로 명령 신호를 전달하는데 필요한 최대 시간을 의미한다. 따라서 SlotTime은 채널의 사용유무를 판단하고 전송을 시작하는데 까지 걸리는 최소 시간을 의미한다. 제안방안에서 사용하는 jam 신호는 특정 패턴을 갖는 약속된 신호로 표준에서 사용하는 프리앰블 구조와 유사하게 설계하면 CCA 시간 내에 검출이 충분히 가능하다. 하지만 제안방안의 경우 전송 시작 후 또 한 번의 센싱을 위해서 송신-수신-송신 과정을 거쳐야 하므로 센싱에 필요한 시간은 기존 SlotTime에 Tx에서 Rx로의 전환시간이 더해져야 한다. 따라서 요구되는 CRS 시간은 다음과 같다.

$$aCRSlotTime = aSlotTime + aTxRxTurnaroundTime \quad (2)$$

아울러 CRS에서의 센싱 시간 동안 다른 단말이 접속하지 않기 위해서는 CRS 시간은 DIFS 시간보다 작아야 한다. 표준에서 DIFS는 TxSIFS+2×aSlotTime로 정의되며 이는 aCRSlotTime 보다는 큰 값에 해당하므로, 결국 요구되는 CRS 시간은 무선랜 시스템에서 사용하는 기본 슬롯시간(aSlotTime)에 Tx/Rx 전환시간(aTxRxTurnaroundTime)을 더한 값으로 설정 가능하다.

둘째로, 채널 효율을 극대화하기 위한 CRP 길이에 대한 결정이 필요하다. CRP가 길수록 충돌 검출 및 해결 확률이 증가하여 전송 성공 확률이 증가하지만, 일단 충돌이 발생하면 CRP는 낭비되는 시간이므로 긴 CRP는 오버헤드가 되어 채널 효율을 떨어뜨린다. 따라서 CRP 길이에 따라 성능에 상충관계(tradeoff)가 존재하며, 전송효율을 최대화하는 최적 CRP 길이가 존재함을 알 수 있다. 휴리스틱하게

충돌 발생량이 증가함에 따라 CRP를 늘리고, 반대의 경우 줄일 수 있으며, 평균 접속률에 따른 최적 CRP를 사전에 계산상(Numerically) 찾아놓고 상황에 맞게 쓸 수 있다.

셋째로, 접속 단말간 공평(fairness) 및 우선순위(priority) 서비스를 위해 CRS 선택 방법에 대한 고려가 필요하다. III장에서 설명한 것과 같이 단말들이 CRP 내에서 CRS를 랜덤하게 선택하면 자원 사용에 대한 공평성이 보장된다. 하지만 긴급 메시지 전송이나 서비스의 질(Quality of Service; QoS)의 보장이 필요한 우선순위 서비스를 제공하기 위해서는 해당 단말에게 전체 CRS 중 앞쪽 번호를 전송으로 할당해 주거나, 구간을 나누어 앞쪽 구간에서 CRS를 선택하도록 해줄 수 있다. 이 경우 우선순위가 높은 단말은 다른 단말보다 작은 번호의 CRS를 선택할 것이기 때문에 충돌 발생시 jam 신호를 전송한 후 충돌 없이 전송을 보장받을 확률이 높아진다.

넷째로, 제안하는 CSMA/CR 프로토콜은 원활한 동작을 위해 은닉 단말이 없는 fully connected single-hop 네트워크 환경을 가정하는데, 실제 무선 통신 환경에서는 은닉 단말이 존재할 수 있으므로 제안 방식이 다른 단말의 carrier 센싱을 항상 보장할 수 없다. 만약 제안 방식이 은닉 단말이 존재하는 환경에서 사용되어야 한다면 단말의 센싱 임계치(threshold)를 조절하여 사전에 은닉 노드의 발생을 막을 수 있다^[18,19]. 즉, 주어진 네트워크에서 단말간 최대 통신 거리가 R이라고 할 때 각 단말의 센싱 거리(sensing range)가 2R이 되도록 센싱 임계치를 설정함으로써 은닉 단말의 발생을 사전에 막을 수 있다. 이는 일반적으로 CSMA 프로토콜이 안정적인 동작을 위해서 센싱 임계치가 통신에 필요한 수신 신호 레벨 보다 낮춰서 사용한다는 점을 감안할 때 가능한 방법 중 하나이다. 하지만 이와 같은 방법에도 불구하고 은닉 단말이 발생한다면 제안 방안은 충돌을 제대로 검출할 확률이 줄어들어 성능에 악영향을 미치게 된다.

V. 시뮬레이션 결과

Monte Carlo 시뮬레이션을 통해 제안 CSMA/CR 을 기존의 기본 CSMA/CA, RTS/CTS 기반의 CSMA/CA, WCSMA/CD와 비교하였다. 시뮬레이션에 사용한 파라미터는 IEEE 802.11 표준에 기반하며 표 1에 정리되어 있다^[4,20]. 가장 널리 사용되

는 OFDM 물리계층 모드를 선택하였고 이에 따라 관련 파라미터가 결정된다. 단말의 채널 접속률을 높이기 위해서 contention window(CW)는 31~255에서 변하도록 조절하였다. WCSMA/CD와 CSMA/CR에서 추가 센싱을 위해 사용되는 CRS의 길이는 실제 센싱하는데 걸리는 시간인 Slot time+TxRxTurnaround time 값으로 결정된다. CRP 길이는 CRS 길이의 정수배로 결정되며 사용 가능한 CRS의 개수를 m이라고 할 때 CRS length×(m+1)으로 결정된다. CRP의 길이, 접속 단말(station) 수, 전송하는 MAC 페이로드 길이를 적절한 범위 내에서 가변하면서 각 MAC 프로토콜의 성능을 비교 분석하였다. 이때 모든 단말은 항상 전송할 데이터를 갖고 있다고 가정하며, 성능 매트릭으로 사용하는 정규화된 전송효율(throughput)은 주어진 채널 가용 시간 대비 전송에 성공한 페이로드 비트만이 사용한 시간의 비로 정의된다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation Parameters

Parameter	Value
PHY mode	OFDM
Minimum CW size	31
Maximum CW size	255
Channel bit rate	6 Mbps
MAC header	256 bits
PHY header	136 bits
ACK length	112 bits + PHY header
RTS length	160 bits + PHY header
CTS length	112 bits + PHY header
Propagation delay	1 μs
TxRxTurnaround time	2 μs
Slot time	9 μs
SIFS	16 μs
DIFS	34 μs
CRS length	11 μs (Slot time+TxRxTurnaround time)
CRP length	CRS length×(1+m) (default m=10)
Number of stations (n)	5~100 (default=50)
Payload size	64~4095 bytes (default=512)
Minimum CW size	31
Maximum CW size	255

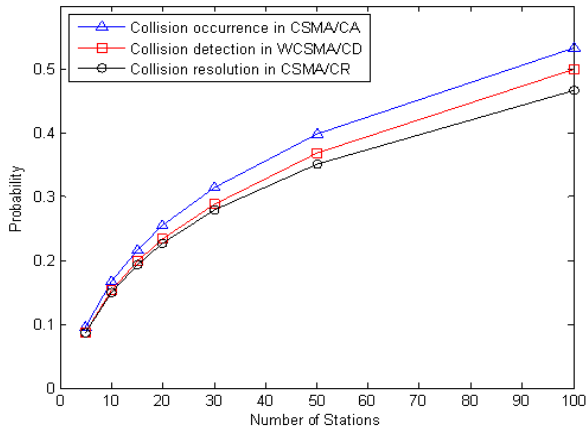


그림 6. 단말 수에 따른 각 접속 방식의 충돌 발생, 충돌 검출, 충돌 해결 확률 (m=10, payload_size=512 bytes)
 Fig. 6. Probabilities of collision occurrence, detection and resolution vs. number of stations (m=10, payload_size=512 bytes)

그림 6은 단말 수에 따른 각 접속 방식의 충돌 발생, 검출, 해결 확률을 보여준다. 이들 확률 값은 단말 수가 증가함에 따라 다 같이 증가한다. CSMA/CA의 충돌 발생 확률이 가장 높으며, WCSMA/CD에서 발생한 충돌 중 이를 검출할 확률이 이보다 조금 낮으며, 다음으로 CSMA/CR에서 발생한 충돌 중 이를 검출하여 해결할 확률이 좀 더 낮게 나온다. 여기에서 충돌 발생 확률에서 충돌 검출과 해결 확률을 각각 뺀 값이 충돌을 검출하지 못하거나, 해결하지 못할 확률이 된다. 제안 방식의 충돌 해결 확률은 충돌 발생 및 충돌 검출 확률과 비교적 큰 차이를 갖지 않으며, 이로 인하여 발생한 충돌에 대해서 많은 부분 해결할 수 있음을 알 수 있다.

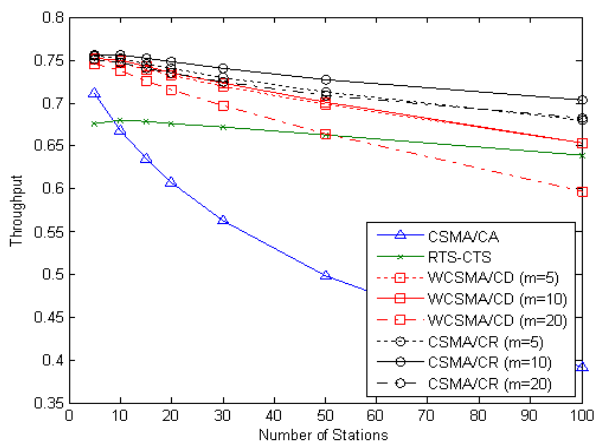


그림 7. 단말 수에 따른 전송효율 (payload_size=512 bytes)
 Fig. 7. Throughput vs. number of stations (payload_size=512 bytes)

그림 7은 접속 단말 수의 증가에 따른 전송효율 성능을 보여준다. 기존 WCSMA/CD와 제안 CSMA/CR 방식의 경우 가용한 CDS 및 CRS의 개수 m을 5, 10, 20으로 설정하고 성능을 보았다. 기본 CSMA/CA의 경우 단말 수가 증가함에 따라 충돌이 증가하고 따라서 전송효율이 급격히 감소함을 볼 수 있다. 반면 RTS/CTS를 사용하는 경우에는 단말 수가 적을 때는 RTS/CTS 전송 오버헤드로 인하여 전송효율이 가장 낮지만, 단말 수가 증가하여도 전송효율은 완만하게 감소한다. 이는 RTS/CTS 교환으로 데이터 전송 전에 충돌 여부를 알 수 있기 때문이다. WCSMA/CD는 RTS/CTS 전송 없이 데이터 전송 초기에 충돌을 검출할 수 있는 RTS/CTS 보다 높은 효율을 보여주며, 제안하는 CSMA/CR은 충돌 검출시 충돌 해결 기능을 통해 충돌 단말 중 적어도 하나의 단말에 대해서는 높은 확률로 다음 번 전송을 성공시키기 때문에 기존 기술대비 성능 이득이 존재한다. WCSMA/CD와 CSMA/CR의 경우 m=10일 때 가장 좋은 성능을 보이며, 이는 적절한 m 값의 선택이 중요함을 알려준다.

그림 8은 접속 단말 수(n)가 50이고, 페이로드의 길이가 512 bytes인 경우에 사용 가능한 CRS 개수 (m)의 변화에 따른 전송효율을 보여준다. WCSMA/CD와 CSMA/CR은 m 값이 너무 작을 때는 충돌 확률이 높아 전송효율이 낮으며, m 값이 너무 큰 경우에는 충돌 발생시 낭비되는 CRP의 길이가 커지므로 전송효율이 낮아진다. 즉, 전송효율을 최대화하는 최적 m 값이 존재한다. CSMA/CR가 WCSMA/CD 보다 충돌 검출 확률이 낮으므로 보다시피 더 큰 m 값에서 최대 성능을 보여준다.

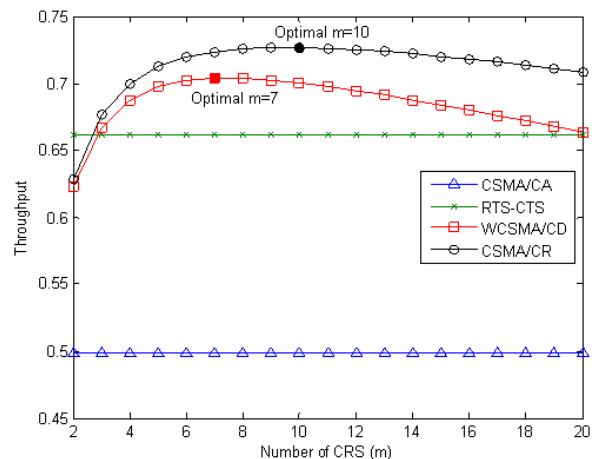


그림 8. 가용 CRS 수에 따른 전송효율 (n=50, payload_size=512 bytes)
 Fig. 8. Throughput vs. number of CRSs (n=50, payload_size=512 bytes)

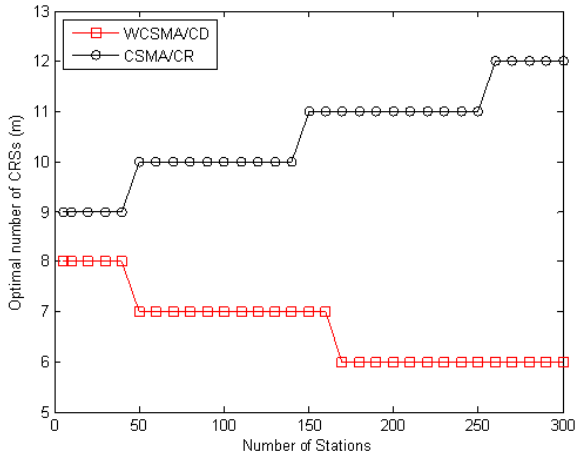


그림 9. 단말 수에 따른 최적 CRS 개수 (payload_size=512 bytes)
 Fig. 9. Optimal number of CRSs vs. number of stations (payload_size=512 bytes)

그림 9는 접속 단말 수를 5~300으로 변화시키면서 구한 최적 CRS 개수를 보여준다. WCSMA/CD의 경우 단말 수가 증가함에 따라 최적 m 값이 작아지는 반면, 제안 CSMA/CR의 경우 최적 m 값이 점점 증가한다. 이는 WCSMA/CD의 경우 그림 4-(a)의 경우에만 충돌을 검출하지 못하기 때문에 동시 전송 단말 수가 증가할수록 충돌을 검출할 확률이 높아지기 때문이다. 또한 최적 m 값은 많은 구간에서 일정한 값을 가지며 단말 수에 그다지 민감하지 않음을 볼 수 있다.

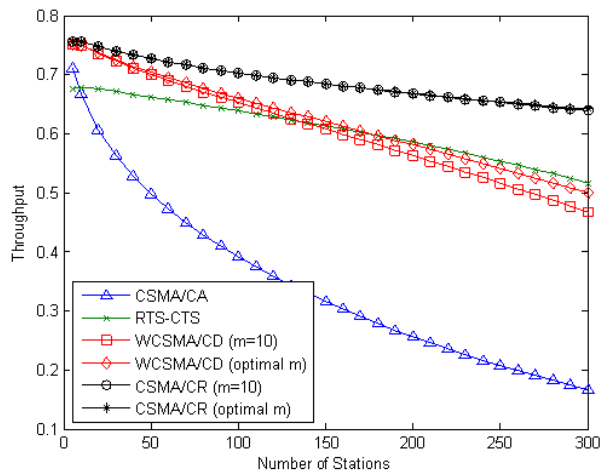


그림 10. 최적 CRS 개수가 적용될 때 단말 수에 따른 전송 효율 (payload_size=512 bytes)
 Fig. 10. Throughput vs. number of stations when optimal number of CRSs is applied (payload_size=512 bytes)

그림 10은 최적 CRS 개수를 적용했을 때 단말 수에 따른 전송효율을 보여준다. 이는 CSMA/CR이

가질 수 있는 최대 전송효율이 되며, 이를 $m=10$ 으로 고정인 경우와 비교하였다. 단말 수를 크게 증가시켜도 CSMA/CR의 경우 고정 m 값과 최적 m 값의 사용 성능이 큰 차이를 갖지 않음을 볼 수 있다. 이는 그림 8에서 보았듯이 전송효율이 최적 m 값 근처에서는 크게 차이가 나지 않기 때문이며, 따라서 접속 단말의 수에 상관없이 적당한 m 값을 선택하여 사용하여도 전송효율 측면에서는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. WCSMA/CD의 경우 $m=10$ 일 때와 최적 m 값일 때 약간의 성능 차이를 보여준다. 아울러 접속 단말 수가 300개로 증가하는 경우 제안 CSMA/CR는 기존 방식대비 약 30%까지 성능 이득이 증가하면서 높은 전송효율을 유지한다.

그림 11은 접속 단말 수가 50, $m=10$ 일 때 전송하는 MAC 페이로드 크기를 64에서 4095 바이트까지 2의 제곱으로 증가함에 따른 전송효율을 보여준다. 페이로드 크기가 커질수록 오버헤드 대비 전송 데이터 비트량이 커지므로 전체적으로 채널효율이 증가한다. 또한 전송 페이로드 크기에 상관없이 CSMA/CA, WCSMA/CD, CSMA/CR 순으로 성능이 좋을 수 있다. 하지만, RTS-CTS의 경우 페이로드 사이즈가 커지면서 전송효율이 점점 좋아져 성능이 역전되는 구간이 발생한다. 이는 페이로드 사이즈가 작을 때는 상대적으로 RTS/CTS 전송 오버헤드가 큰 비중을 차지하여 전송효율이 가장 낮지만, 페이로드 사이즈가 커짐에 따라 RTS/CTS 전송이 차지하는 비중이 줄어들고 충돌이 발생하지 않은 경우에만 데이터를 전송하기 때문에 전송효율이 다른 방식에 비해 좋아진다.

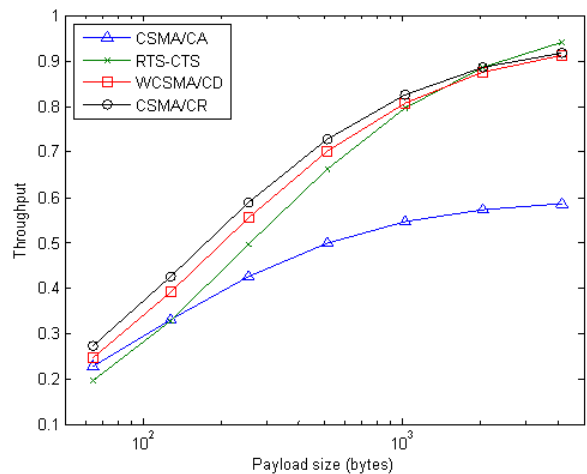


그림 11. 전송하는 Payload 크기에 따른 전송효율 (n=50, m=10)
 Fig. 11. Throughput vs. transmitted payload size (n=50, m=10)

VI. 결 론

본 논문에서는 개연성 있는 차세대 무선랜 환경으로 고밀도 fully-connected single hop 네트워크 구조를 고려하여 CSMA/CR이라고 불리는 분산 MAC 프로토콜을 제안하였다. 제안방안은 CSMA/CA 방식을 준수하여 기존 MAC 방식과 호환성을 보장하며, CSMA/CD의 충돌 검출 방식을 무선 상황에 맞게 적용하여 RTS/CTS 사용 없이 빠른 시간 내에 충돌을 검출할 수 있다. 또한 충돌이 검출되면 다음 전송 시에는 자원을 전용으로 할당하여 추가 충돌을 해결한다. 제안 CSMA/CR의 실용화를 위해 고려해야 할 CRS의 길이, CRP의 길이, CRS의 선택 방법에 관한 구현 이슈를 살펴보고, 대표적인 분산 무선 MAC 프로토콜과 성능 비교를 수행하였다. 시뮬레이션 결과 CSMA/CR은 RTS/CTS 사용 없이 충돌을 발견할 수 있어 오버헤드가 적고, 충돌 발생시에는 다음번 전송에 대해서는 예약방식으로 충돌을 없애줌으로써 접속 노드수에 상관없이 가장 좋은 전송효율을 보여준다. CSMA/CR은 은닉 단말이 없는 fully-connected single hop 네트워크에서 동작한다는 제약과 추가 기능으로 인하여 송신기의 복잡도를 증가시키는 단점이 존재하지만, 기존 CSMA/CA와의 호환성을 보장하면서 향상된 충돌 해결 방법을 제공하므로 향후 단말 수가 많은 고밀도 무선 접속 환경에서 효과적으로 사용 가능하리라 기대한다.

References

- [1] OUTLOOK: Visions and research directions for the Wireless World, WWRF(World Wide Radio Forum), July, 2009. from <http://www.wireless-world-research.org>
- [2] A. Colvin, "CSMA with collision avoidance," *Elsevier Computer Commu.*, vol. 6, no. 5, pp. 227-235, Oct. 1983.
- [3] P. Karn, "MACA - a new channel access method for packet radio," in *Proc. ARRL/CRRL Amateur Radio Computer Netw. Conf.*, London, Sep. 1990.
- [4] IEEE Std 802.11-2007, *Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, Jun. 2007.
- [5] I. Tinnirello, S. Choi, and Y. Kim, "Revisit of RTS/CTS exchange in high-speed IEEE 802.11 networks," in *Proc. IEEE WoWMoM*, pp. 240-248, Taormina-Giardini Naxos, Jun. 2005.
- [6] P. Chatzimisios, A.C. Boucouvalas, and V. Vitsas, "Effectiveness of RTS/CTS handshake in IEEE 802.11a wireless LANs," *Electron. Lett.*, vol. 40, no. 4, pp. 915-916, Jul. 2004.
- [7] IEEE Std 802.11h-2003, *Amendment 5: Spectrum and transmit power management extensions in the 5 GHz band in Europe*, Oct. 2003.
- [8] IEEE 802.11af-Draft 2.0, *Amendment: TV White Spaces Operation*, July 2012, from <http://www.ieee802.org/11>
- [9] IEEE 802.11ah, *Sub 1 GHz sensor network, smart metering*, from <http://www.ieee802.org/11>
- [10] IEEE 802.3-2008: ETHERNET - IEEE Standard for Information technology-Specific requirements - *Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications*
- [11] W. F. Lo and H. T. Mouftah, "Collision detection protocol for radio channels," in *Proc. Biennial Symp. Comm.*, pp. 1-6, May 1984.
- [12] L. Wing, and H. Mouftah, "Collision detection and multitone tree search for multiple-access protocols on radio channels," *IEEE J. Sel. Area. in Comm.*, vol. 5, no. 6, pp. 1035-1040, Jul. 1987.
- [13] R. Rom "Collision Detetion in Radio Channels," *Local Area and Multiple Access Networks*, Computer Science Press, 1986.
- [14] T. Nilsson, G. Wikstrand, and J. Erikson, "Early multicast collision detection in CSMA/CA networks," in *Proc. IEEE Conf. Mobile and Wirel. Commu. Netw. (MWCN 2002)*, pp. 294-298, Stockholm Sweden, Sep. 2002.
- [15] K. Voulgaris, A. Gkelias, I. Ashraf, M.

Dohler, and A. H. Aghvami, "Throughput Analysis of Wireless CSMA/CD for a finite user population," in *Proc. IEEE VTC 2006*, pp. 1-5, Montreal, Canada, Sep. 2006.

- [16] J. Wangs, S. Premvuti and A. Tabbara, "A wireless medium access protocol (CSMA/CD-W) for mobile robot based distributed robotic systems," in *Proc. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2561-2566, Minnesota, USA, Aug. 1995.
- [17] D. H. Kim and J. H. Kim, "CSMA/CD with reservation in wireless communication: a novel approach to resolve collisions," in *Proc. ICCAS 2007*, pp. 2858-2864, Seoul, Korea, Oct. 2007.
- [18] J. Y. Seol and S.-L. Kim, "Iterative approximation of carrier sensing radius in CSMA-based wireless Ad Hoc networks," *J. KICS*, vol. 36, no. 12, pp. 1006-1014, Dec. 2011.
- [19] P. Jeong, Y. Shin, W. Lee, and M. Yoo, "A communication protocol based on safety zone for solving hidden node problem in cognitive radio networks," *J. KICS*, vol. 33, no. 1, pp. 8-16, Jan. 2008.
- [20] G. Bianchi, "Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function," *IEEE J. Sel. Area. Comm.*, vol. 18, no. 3, pp. 535-547, Mar. 2000.

최 현 호 (Hyun-Ho Choi)



2001년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업
 2003년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 석사
 2007년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 박사
 2007년 3월~2011년 2월 삼성종합기술원 전문연구원
 2011년 3월~현재 국립한경대학교 전기전자제어공학과 조교수
 <관심분야> 매체접속제어, 분산자원관리, 저전력 프로토콜, Beyond 4G 시스템