

Cognitive Radio 통신망을 위한 MAC 프로토콜

이동현 · 하기웅 ·
전화숙 · 정동근*

서울대학교
전기 · 컴퓨터공학부 ·
*한국의국어대학교 전자공학과

요 약 문

인지 무선(CR: Cognitive Radio) 기술은 특정 사용자에게 허가되었으나 일정 시간, 일정 지역에서 사용되지 않는 주파수 대역을 찾아 한시적으로 사용함으로써 주파수 사용 효율을 높이는 기술이다. CR 기술을 사용하는 무선 통신 시스템을 구현하기 위해서는 효과적인 채널 센싱 스케줄링, 채널 선택, 채널 전환 기법을 제공하는 매체 접근 제어(MAC: Medium Access Control) 프로토콜의 개발이 필수적이다. 이 글에서는 CR MAC 프로토콜의 특징과 설계시 고려사항을 검토하고, 현재까지 제안된 몇 가지 CR MAC 프로토콜을 살펴본다. 이를 통해 최신 연구 동향을 파악하고 향후 연구 과제를 제시한다.

I. 서 론

무선 통신 서비스가 보편화되고 사용자의 서비스 수요도 다양해짐에 따라, 기존 무선 통신 서비스의 데이터 전송 속도를 더욱 높이거나 새로운 통신 서비스를 개발하려는 시도가 계속되고 있다. 이러한 고속 무선 통신 서비스를 제공하기 위해서는 많은

주파수 자원이 필요한데, 통신에 적합한 대부분의 주파수 대역이 이미 기존의 무선 통신 또는 방송 서비스에 할당되어 있어 새로운 무선 통신 서비스를 위한 주파수 대역의 확보가 쉽지 않다. 주파수 부족 문제를 해결하기 위해 최근 각광 받고 있는 기술 중 하나가 인지 무선(CR: Cognitive Radio)이다.

CR은 특정 사용자에게 허가되었으나 일정 시간, 일정 지역에서 사용되지 않는 주파수 대역을 찾아 한시적으로 사용함으로써 주파수 사용 효율을 높이는 기술이다¹⁾. 여기서 특정 주파수 대역의 사용 허가를 받은 사용자를 선순위 사용자(PU: Primary User)라 한다. CR 기술을 사용하는 통신망(이하, CR 통신망)의 트래픽 전송은 PU의 통신에 영향을 주지 않아야 한다. CR 통신망을 구현하기 위해서는 PU의 주파수 사용 상황을 파악(인지)하여 PU를 거의 간섭하지 않으면서 CR 노드(node)가 통신할 수 있게 하는 매체 접근 제어(MAC: Medium Access Control) 프로토콜(이하, CR MAC 프로토콜)이 필요하다.

지금까지 제안된 일반적 CR 통신망은 주파수 사용 현황을 파악하기 위해 CR 시스템이 채널을 센싱(sensing)하고, 만약 사용 중인 채널에서 PU가 전송을 시작하면 CR 시스템 전체가 그 채널을 비우고

1) 이 글에서는 주파수 대역을 할당받아 해당 주파수 대역을 사용하는 우선권을 가지는 기존 무선 통신 서비스를 PU라는 용어로 정의한다.
2) CR 통신망은 통상 하나의 PU가 사용하는 채널 단위로 주파수 대역을 이용한다. 예를 들어, 미국 TV 방송 대역의 경우 54~746 MHz에서 6 MHz 단위로 주파수 대역이 나뉘어져 있으므로 이 주파수 대역에서 동작하는 CR 통신망은 6 MHz의 채널을 사용한다.

다른 채널로 이동한다. 물리(PHY: physical) 계층에서 이루어지는 채널 센싱 결과를 채널 액세스와 결부시키기 위해 CR MAC 프로토콜은 전통적인 MAC 프로토콜의 기능과 함께 다음과 같은 기능도 수행하여야 한다.

- 채널 센싱 스케줄링(channel sensing scheduling): 채널 센싱 수행 CR 노드(node), 센싱 시기, 대상 채널 결정
- 채널 선택(channel selection): 각 CR 노드가 전송에 사용할 채널 결정
- 채널 전환(channel switching): 사용 중인 채널에서 PU가 전송을 시작한 경우 PU가 없는 다른 채널로 사용 채널 변경

이 글에서는 전통적 MAC과 구별되는 CR MAC 프로토콜의 특징을 알아보고, 현재까지 제안되어 있는 몇몇 CR MAC 프로토콜에 대해 채널 센싱 스케줄링, 채널 선택, 채널 전환을 중심으로 살펴본다. 이를 통해 CR MAC 프로토콜의 연구 동향을 파악하고 향후 연구 방향을 제시한다.

II. CR MAC 프로토콜의 특징

일반적 무선 통신망과 마찬가지로 CR 통신망도 중앙 제어 노드의 존재 여부에 따라 중앙 집중형(centralized)과 분산형(distributed)으로 나눌 수 있다.

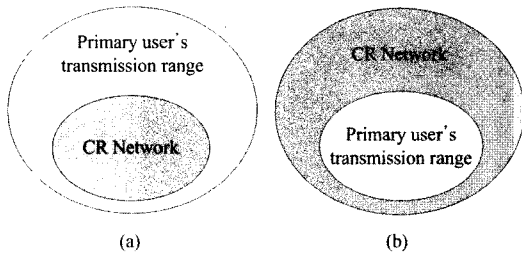
중앙 집중형 CR 통신망에서는 중앙 제어 노드(centralized controller)가 존재하여 전체 통신망을 관리한다. 중앙 제어 노드는 각 CR 노드에게 센싱할 채널과 센싱 시기를 지시하고 센싱 결과를 보고 받아 사용 중인 채널의 전환 여부를 결정한다. 중앙 집중형 CR 통신망은 주로 모든 CR 노드가 하나의 채널

을 공유하는 단일 채널(single-channel) 모드로 동작한다. 이 때 CR 노드들은 중앙 제어 노드의 관리 하에 경쟁 없이 통신하는 것이 일반적이다. 사용 중인 채널에 PU가 나타나면 중앙 제어 노드의 지시에 따라 모든 CR 노드가 다른 채널로 이동한다. 중앙 집중형 CR 통신망은 센싱을 위해 필수적인 침묵 기간(quiet period)³⁾을 중앙 제어 노드가 관리하므로 분산형 CR 통신망보다 효율적으로 침묵 기간 관리할 수 있다.

분산형 CR 통신망에는 중앙 제어 노드가 없고 각 CR 노드가 스스로 채널 사용 방법을 결정한다. 분산형 CR 통신망은 다수의 통신 채널 풀(pool)을 사용하는 복수 채널(multi-channel) 방식으로 동작하는 경우가 많다. 각 CR 노드는 독립적으로 PU가 없는 채널 중 일부를 선택하여 사용한다. 많은 경우, 분산형 복수 채널 방식에서는 송신 노드와 수신 노드간의 제어 정보 교환을 위해 일반 데이터 채널과 구별되는 제어 채널(control channel)을 둔다. 제어 채널은 주파수, 시간, 또는 코드상 데이터 채널과 구별된다. 송신 노드와 수신 노드는 제어 채널을 통해 데이터를 전송할 채널을 협상하고 주변 노드(neighbor node)에게 이를 알려 노드 간 전송 충돌(collision)을 방지한다.

각 CR 노드가 하나의 송수신기(transceiver)만 가지고 있는 경우, 송수신기는 제어 정보의 교환과 데이터의 송수신에 번갈아 이용된다. 각 CR 노드가 다수의 송수신기를 가지고 있으면, 하나의 송수신기는 제어 채널에 고정하여 다른 CR 노드와 제어 정보를 교환하고, 나머지를 데이터 송수신에 이용할 수 있다. 하나의 송수신기만 사용하면 다수의 송수신기를 사용하는 것보다 비용이 저렴하고 하드웨어 복잡도도 낮으므로 하나의 송수신기만을 사용하는 시스템을 위한 CR MAC 프로토콜 연구가 활발히 이루어지

3) CR 노드가 채널 센싱을 수행할 때 인접한 CR 노드의 전송 신호는 간섭으로 작용하여 센싱 결과의 신뢰도를 떨어뜨린다. 따라서 정확한 센싱을 위해 CR 통신망 내의 모든 CR 노드가 통신을 중단하는 침묵 기간을 가지고 그 기간 동안 채널을 센싱한다.



[그림 1] PU의 전송 범위와 CR 통신망 영역 간의 관계

고 있다. 그런데 하나의 송수신기만 가지고 있는 CR 노드는 특정 채널에서 데이터 송수신을 수행하고 있을 때 제어 채널에서 교환되는 제어 정보를 수집할 수 없다. 이 경우, 복수 채널 은닉 노드 문제(multi-channel hidden node problem)^[3]가 야기될 수 있다. 이러한 CR MAC 프로토콜은 복수 채널 은닉 노드 문제를 해결하기 위한 기법을 제공해야 하며, 이 문제에 대한 자세한 설명은 3절에서 다룬다.

한편, PU의 전송 범위와 CR 시스템의 서비스 영역의 상대적 크기에 따라 CR MAC 프로토콜이 달리 설계되어야 한다. [그림 1](a)에서와 같이 PU의 전송 범위가 CR 통신망 영역보다 상대적으로 크다면 모든 CR 노드는 각 채널에 대해 의미 있는 센싱 결과를 얻을 수 있다. 이러한 상황에서 모든 CR 노드가 모든 채널을 중복 센싱하는 것은 시간 낭비가 될 수 있다. 각 CR 노드가 각기 다른 채널을 분담하여 센싱하고 그 결과를 공유한다면 센싱에 소요되는 시간을 줄일 수 있다. 이때 중앙 집중형 CR 통신망은 중앙 제어 노드가 있기 때문에 각 CR 노드에게 센싱할 채널을 쉽게 분배할 수 있다. 그러나 분산형 CR 통신망은 중앙 제어 노드가 없기 때문에 각 CR 노드가 센싱할 채널을 적절히 선택할 수 있게 하는 기법이 필요하다.

[그림 1](b)에서와 같이 PU의 전송 범위가 CR 통신망 영역보다 상대적으로 작다면 PU의 존재를 CR 통신망의 일부 노드만 감지할 수도 있다. 이러한 상

황에서는 PU를 발견하지 못한 CR 노드의 전송으로 말미암아 해당 PU의 전송 품질이 저하될 수 있다. 이러한 PU를 은닉(hidden) PU^[4]라고 정의하고, CR MAC은 이에 대처하는 방안을 가져야 한다.

III. CR MAC 프로토콜 사례

이 절에서는 현재까지 제안된 몇 가지 CR MAC 프로토콜을 중앙 집중형 CR MAC 프로토콜과 분산형 CR MAC 프로토콜로 나누어 살펴본다.

3-1 중앙 집중형 CR MAC 프로토콜

3-1-1 IEEE 802.22 WRAN MAC^[5]

IEEE 802.22 WRAN(Wireless Regional Area Network)은 TV 방송 대역을 이용하여 도시 외곽이나 시골(rural) 지역에서 무선 인터넷 서비스를 제공하는 CR 통신망이다. WRAN 시스템의 한 셀(cell) 내에서 중앙 제어 노드 역할을 하는 기지국(base station)은 반경 수십 km에 이르는 넓은 지역에 분포하는 사용자국(customer premise equipment)에게 서비스를 제공한다. TV 대역의 PU에는 TV 방송 시스템뿐 아니라 무선 마이크(wireless microphone)도 있다. 이들 PU를 보호하기 위해 WRAN 시스템은 채널 센싱과 채널 전환을 이용하며, 채널 센싱의 경우 침묵 기간으로 낭비되는 무선 자원을 되도록 줄이기 위해 두 단계로 나누어 센싱한다. 즉, 1단계 센싱은 비교적 짧은 침묵 기간을 주기적으로 배치하여 에너지 검출(energy detection)과 같은 센싱 방법을 사용해 신호의 존재 여부만을 감지한다. 1단계 센싱에서 만약 불특정 신호의 존재가 확인되면 2단계 센싱으로 긴 침묵 기간에서 좀더 정확한 센싱 방법을 사용해 해당 신호가 PU의 신호인지 판단한다. 이와 같은 두 단계 센싱 기법을 통해 침묵 기간에 소요되는 시간을 줄임으로써 CR 사용자의 성능 저하를 최소화한다.

만약 WRAN 시스템이 사용 중인 채널을 이용하여 PU가 전송을 시작했음을 감지하면 기지국의 주 도파에 해당 셀 전체가 PU가 없는 다른 채널로 이동해야 한다. 이때 이동한 채널에서 통신을 재개하기 까지 소요되는 시간이 길어지면 사용자의 서비스 품질(QoS: Quality-of-Service)이 크게 떨어질 수 있으므로 이 시간을 되도록 줄여야 한다. 이를 위해 WRAN 시스템은 옮겨갈 수 있는 백업(backup) 채널을 미리 준비해 두고 백업 채널 정보를 사용자국과 기지국이 공유한다.

3-1-2 IEEE 802.11h MAC^[6]

IEEE 802.11 WLAN(Wireless Local Area Network)은 ISM(Industrial, Scientific and Medical) 대역을 사용한다. 그런데 ISM 대역 중 일부인 5 GHz 대역이 유럽에서는 레이더(radar)와 인공위성용으로 할당되어 있다. IEEE 802.11h은 5 GHz 대역에서 레이더나 인공위성 통신을 방해하지 않으면서 동작하는 WLAN 표준이다. 이 경우 레이더나 인공위성이 PU가 되고 WLAN이 CR 통신망이 되는 셈이다.

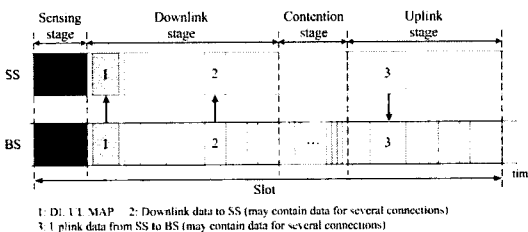
IEEE 802.11h는 주기적인 침묵 기간을 두어 사용 중인 채널을 센싱한다. 이 밖에 IEEE 802.11h는 TPC(Transmission Power Control)와 DFS(Dynamic Frequency Selection) 등과 같은 CR 기법을 규정한다. 레이더와 인공위성 모두를 PU로서 보호하지만 보호의 수준에 차이가 있다. 사용 중인 채널에 레이더의 신호가 감지되는 경우 IEEE 802.11h 시스템은 DFS를 이용하

여 레이더가 이용하는 채널을 회피해야 하는 반면, 인공위성의 신호가 감지되면 TPC를 이용하여 전파 규제 요구 사항(regulatory requirement)보다 낮은 평균 전송 전력을 유지하며 통신을 지속할 수 있다. 이러한 절차의 수행 여부는 BSS(Basic Service Set) 모드에서는 AP가 결정하며, AP가 존재하지 않는 IBSS(independent BSS) 모드에서는 DFS owner로 선택된 하나의 노드가 결정한다.

3-1-3 Chen의 MAC^[7]

Chen 등이 제안한 MAC은 PU의 전송에 따라 채널의 상황이 빠르게 변하는 PMP(Point to Multi-Point) 통신망 환경을 대상으로, 이미 수락된 여러 종류 연결(connection)들의 QoS를 보장할 수 있도록 설계되었다. 이 PMP 통신망은 하나의 기지국과 다수의 가입자국(SS: Subscribe Station)으로 이루어져 있으며, 전체 통신망이 하나의 통신 채널을 선택하여 TDMA(Time Division Multiple Access) 방식으로 통신한다. 통신망의 시간은 슬롯(slot) 단위로 나뉘며, [그림 2]와 같이 하나의 슬롯은 채널을 센싱하여 다음 통신을 위한 채널로 이동하는 센싱 구간(sensing stage), DL(downlink)/UL(uplink) MAP과 데이터를 정방향으로 전송하는 하향 링크 구간(downlink stage), 새로운 CR 노드가 기지국에 등록하기 위한 경쟁 구간(contention stage), 그리고 데이터를 역방향으로 전송하는 상향 링크 구간(uplink stage)으로 구분된다.

PU의 전송에 따라 채널의 상황이 빠르게 변화하는 환경에서는 각 채널에 대한 센싱 결과가 유효한 시간이 짧으므로 센싱을 통해 채널 선택에 사용할 수 있는 채널의 수가 제한된다. 따라서 Chen의 MAC은 전체 채널의 가용 확률을 기반으로 가용 확률이 높은 몇 개의 채널만 센싱하고, 그 결과를 바탕으로 각 노드가 같은 알고리즘으로 같은 채널을 선택하게 한다. 센싱 구간이 끝나면 모든 노드가 같은 채널을 선택하여 이동하게 되고, 이동 후에는 기지국으로부터



[그림 2] Chen의 MAC 동작 예

DL/UL MAP을 받고 다시 데이터를 전송하게 된다. 이는 PU의 전송에 따라 채널의 상황이 빠르게 변화하는 환경에서도 가입자들이 동기를 잃지 않으며 연결을 유지할 수 있게 된다. 따라서 기지국은 다양한 무선자원관리기법인 수락 제어(admission control), 전송 속도 제어(rate control), 자원 할당(resource allocation) 알고리즘을 통해 이러한 연결들의 QoS를 보장할 수 있다.

3-2 분산형 CR MAC 프로토콜

분산형 CR MAC 프로토콜은 각 CR 노드가 가지는 송수신기의 수에 따라 동작 방식이 크게 달라진다. 이 절에서는 하나의 송수신기를 사용하는 CR MAC 프로토콜과 두 개의 송수신기를 사용하는 CR MAC 프로토콜로 구분하여 살펴본다.

3-2-1 하나의 송수신기를 사용하는 CR MAC 프로토콜

하나의 송수신기를 사용하는 대다수 MAC 프로토콜에서는 송신 노드와 수신 노드는 제어 채널에서의 메시지 교환을 통해 전송에 사용할 채널을 선택하고, 그 채널로 옮겨 데이터를 송수신한다.

3-2-1-1 Thoppian의 MAC^[8]

이 MAC은 주파수 사용 현황을 파악하기 위한 채널 센싱을 수행하지 않는다. 대신 각 CR 노드는 각 채널에 대한 우선순위를 유지하여 패킷 전송이 실패한 채널에 대해 채널 선택 우선순위를 떨어뜨림으로써 PU와의 간섭을 조절한다. 송신 노드와 수신 노드는 제어 채널에서의 메시지 교환을 통해 두 노드 모두 사용할 수 있는 채널 중 우선순위가 가장 높은 채널을 선택하고, 선택된 데이터 채널로 옮겨 통신한다. 패킷 전송에 성공하면 사용한 채널의 우선순위를 증가시키거나 실패하면 사용한 채널의 우선순위를 감소시킨다(채널 상태가 나빠졌을 가능성이 있으므로). 특히 한 채널에서 연속적으로 패킷 전송에 실패

하면 PU로부터의 간섭으로 인한 전송 실패일 가능성이 높기 때문에 해당 채널의 우선순위를 급격히 떨어뜨린다. 이 MAC 프로토콜은 채널 센싱에 필수적인 침묵 기간이 필요 없다는 장점이 있으나 복수 채널 은닉 노드 문제를 해결하지 못하고, CR 노드의 패킷 전송에 영향을 주지 않는 PU를 보호할 수 없다는 단점을 가진다.

3-2-1-2 HC-MAC^[9]

HC-MAC(Hardware-constrained Cognitive MAC)은 센싱 제약(sensing constraint)과 전송 제약(transmission constraint)이라는 두 가지 하드웨어 제약을 고려하여 설계되었다. 여기서 센싱 제약이란 하나의 송수신기로 특정 시간동안 센싱할 수 있는 채널의 수가 제한된다는 것이고, 전송 제약은 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식을 통해 여러 채널을 모아서 사용할 경우(channel aggregation)에 사용 스펙트럼의 범위와 스펙트럼 조각의 수가 제한된다는 것을 의미한다. 이와 같은 환경에서 채널 사용 효율을 높이려면 센싱하는 채널의 수를 줄여 센싱 부담(overhead)을 적게 해야 하고, 가용 채널의 수를 늘리려면 더 많은 채널을 센싱해 보는 것이 좋다. 그러나 가용 채널을 더 많이 확보할 수 있는 기회와 센싱 부담은 서로 상충(tradeoff) 관계에 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 HC-MAC은 현재까지의 센싱 부담과 확보된 가용 채널의 대역폭을 고려하여 센싱을 중단할지 여부를 optimal stopping rule^[10]에 따라 결정한다. 센싱을 중단할 경우, 확보된 가용 채널에서 전송을 시작한다. 하지만 optimal stopping rule은 전체 채널의 수에 따라 높은 계산 복잡도를 가질 수 있기 때문에 복잡도를 줄이면서도 optimal stopping rule과 유사한 성능을 낼 수 있는 k-stage look-ahead rule이 제안되었다. k-stage look-ahead rule은 앞으로 k개의 채널을 더 센싱했을 때 확보가 기대되는 대역폭과 현재 확보된 가용 채널의 대역폭을 비교하여 앞으로의

센싱 여부를 결정하게 된다. 그러나 HC-MAC은 하나의 송신 노드/수신 노드 쌍이 전송 중일 때 다른 노드는 전송할 수 없도록 제한되므로 채널 사용 효율이 떨어질 뿐만 아니라 제어 채널의 부하가 크다는 단점이 있다.

3-2-1-3 CREAM-MAC^[11]

CREAM(cognitive radio-enabled multi-channel)-MAC은 CR 노드가 하나의 송수신기만을 가질 때 발생하는 복수 채널 은닉 노드 문제를 다룬 MAC 프로토콜이다. [그림 3]은 복수 채널 은닉 노드 문제가 발생하는 예를 나타낸다. [그림 3]에서 노드 A는 노드 B로 패킷을 전송하기 위해 제어 채널에서 RTS(Request-To-Send)를 전송하고, RTS를 수신한 노드 B는 노드 A와의 2번 채널을 통신 채널로 선택하였음을 CTS(Clear-To-Send)를 통해 알린다. 그러나 이때 노드 C는 노드 D와 1번 채널에서 통신하고 있기 때문에 이 CTS를 수신하지 못한다. 따라서 1번 채널에서 전송을 마친 노드 C는 2번 채널을 비어 있다고 판단하고 2번 채널에서 패킷을 전송함으로써 충돌을 일으킨다. 이러한 현상은 채널 사용 효율을 떨어뜨리기 때문에 복수 채널 은닉 노드 문제라고 불린다.

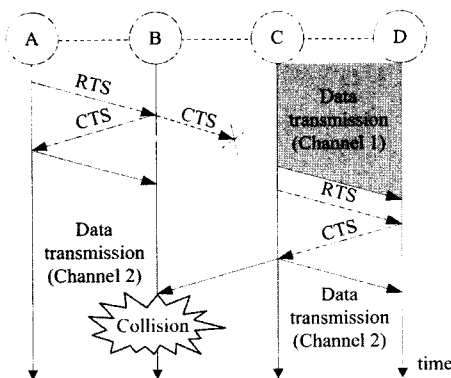
CREAM-MAC은 제어 채널에서 송신 노드와 수신 노드간의 메시지 교환을 통해 사용 채널을 결정하고

해당 채널로 이동하여 통신을 시작한다. 이때 통신 시간이 최대 T 를 넘지 않도록 제한하며, 이 시간은 고정된 파라미터로서 PU의 전송 품질에 영향을 주지 않도록 설정되어야 한다. 그리고 송신 노드와 수신 노드는 통신을 마친 후, 최근 전송에 사용했던 채널 이외의 다른 채널을 T 시간 내에는 사용하지 못하도록 제한된다. 이것은 송신 노드와 수신 노드가 통신하고 있을 때 다른 채널에서 통신을 시작한 CR 노드가 통신을 마치고 제어 채널로 돌아오는 것을 기다리는 동작이다. 따라서 노드 간 충돌을 방지할 수 있어 복수 채널 은닉 노드 문제를 해결할 수 있다. 한편, T 가 너무 짧게 설정되면 채널 사용 효율이 떨어지고, 너무 길게 설정되면 PU의 전송 품질에 영향을 주게 된다. 따라서 CREAM-MAC이 PU를 보호하면서도 효율적으로 채널을 사용하기 위해서는 최적의 T 값을 찾는 것이 매우 중요하다.

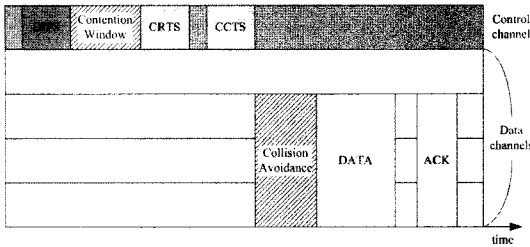
3-2-1-4 SCA-MAC^[12]

SCA(Statistical Channel Allocation)-MAC은 채널 통계를 기반으로 패킷의 전송 성공 확률을 예측하여 가장 높은 전송 성공 확률을 가지는 채널에서 전송한다. 패킷의 전송 성공은 주어진 패킷이 특정 채널에서 전송되는 기간동안 해당 채널에 PU가 전송을 시작하지 않은 경우로 정의된다. 패킷의 전송 성공 확률을 계산할 때 사용하는 채널 통계는 채널의 사용률(utilization), PU가 전송하지 않아 채널이 비어 있는 기간(idle period)의 길이이다. 이를 위해 각 채널의 idle 기간과 busy 기간의 길이를 주기적으로 기록한다. 전송 성공 확률은 채널 통계뿐만 아니라 전송 채널의 수에도 영향을 받는다. 즉, 전송 채널의 수가 증가하면 주어진 패킷을 전송하는데 소요되는 시간이 짧아지기 때문에 전송 성공 확률이 증가한다.

[그림 4]는 SCA-MAC이 다수 채널 집적(aggregation) 방식으로 동작하는 예를 나타낸다. 송신 노드와 수신 노드가 CSMA/CA 기반으로 동작하는 제어



[그림 3] 복수 채널 은닉 노드 문제의 예



[그림 4] SCA-MAC의 동작 예

채널을 통해 전송 채널을 협상하고, 전송 채널이 결정되면 그 채널로 이동하여 일정 기간 동안 센싱한다. 이를 통해 해당 채널에서 전송 중인 다른 CR 노드의 신호를 감지하면 복수 채널 은닉 노드 문제를 해결할 수 있다. 그러나 SCA-MAC은 채널의 수가 늘어남에 따라 가장 높은 전송 성공 확률을 가지는 채널을 선택하기 위한 계산 복잡도가 지수적으로 증가하는 단점이 있다.

3-2-2 두 개의 송수신기를 사용하는 CR MAC 프로토콜

두 개의 송수신기를 사용하는 MAC 프로토콜에서는 통상 하나의 송수신기는 제어 채널에 고정하고, 나머지 송수신기는 데이터 통신에 사용한다.

3-2-2-1 Nan의 MAC^[4]

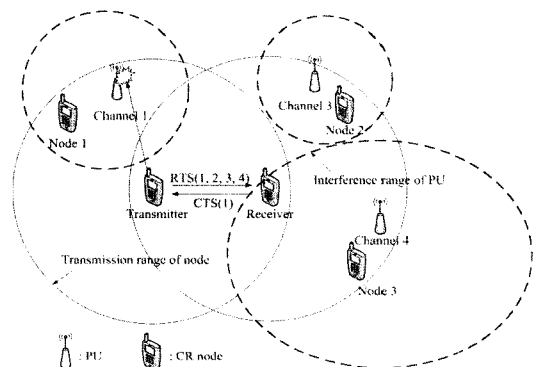
이 MAC은 PU의 전송 범위가 CR 통신망의 영역보다 상대적으로 작은 환경에서 발생할 수 있는 은닉 PU 문제를 해결하였다. 은닉 PU 문제는 전송하려고 하는 CR 노드가 발견하지 못하는 PU가 있어서 해당 노드의 전송이 PU의 전송에 간섭을 주는 문제를 의미한다. [그림 5]는 은닉 PU 문제가 발생하는 예를 나타낸다. 이 예에서 전체 채널의 수는 총 4개라고 가정하자. 송신 노드는 1번 채널에 있는 PU의 전송 범위 밖에 있기 때문에 해당 PU의 전송을 감지하지 못한다. 따라서 송신 노드는 모든 채널을 사용할 수 있다고 판단하고 전송을 초기화하기 위해 RTS에 1, 2, 3, 4번 채널을 사용할 수 있다는 정보를

담아 전송한다. RTS를 수신한 수신 노드는 이 중 1, 2, 3번 채널을 사용할 수 있다고 판단한다. 이때 수신 노드가 제어 채널에서 RTS와 CTS 교환을 통해 1번 채널을 사용 채널로 선택한다면 송신 노드의 전송 신호가 1번 채널의 PU에게 간섭을 주게 된다.

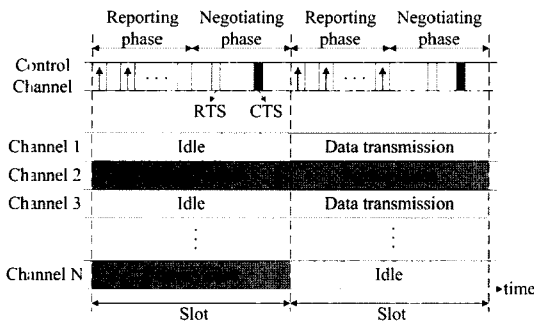
Nan의 MAC은 이러한 은닉 PU 문제를 해결하기 위해 RTS/CTS 교환 시 송신 노드와 수신 노드의 주변 노드로부터 PU 정보를 보고받는다. [그림 5]의 예에서 송신 노드가 전송한 RTS를 주변 노드가 수신하면 1번 노드는 1번 채널에 PU가 있다고 송신 노드에게 보고한다. 송신 노드는 RTS를 수정하여 2, 3, 4번 채널을 사용할 수 있다는 정보를 담아 전송한다. 수정된 RTS를 수신한 수신 노드는 CTS대신 CHREQ라는 패킷에 2, 3, 4번 채널 중 2, 3번 채널을 사용할 수 있다는 정보를 담아 전송한다. 이를 수신한 2번 노드는 3번 채널에 PU가 있음을 수신 노드에게 알린다. 이에 수신 노드는 사용 채널로 2번 채널을 선택하고 CTS를 통해 송신 노드에게 알린다. 이 MAC 프로토콜의 단점은 채널 선택할 때마다 주변 노드로부터 PU 정보를 보고 받아야 하기 때문에 제어 채널의 부하가 커진다는 점이다.

3-2-2-2 CO-MAC^[13]

CO-MAC(Cross-layer based Opportunistic MAC)은



[그림 5] 은닉 PU 문제



[그림 6] CO-MAC의 동작 예

CR 통신망의 영역이 PU의 전송 범위보다 상대적으로 작은 환경에서 중앙 제어 노드 없이 CR 노드들이 채널을 센싱하는 부담을 분담하고 그 결과를 공유하는 분산형으로 설계되었다. 그리고 이 MAC 프로토콜은 두 개의 송수신기를 이용하여 하나는 제어 채널을 통해 센싱한 결과를 공유하고 채널 접근을 경쟁하는데 쓰이며, 나머지 하나는 가용 채널을 사용하여 실제 데이터를 전송하기 위해 사용된다. 시스템 시간은 슬롯 단위로 나뉘며 제어 채널에서의 한 슬롯은 크게 보고 단계(reporting phase)와 협상 단계(negotiation phase)로 나뉘고, 다시 보고 단계는 전체 채널 수만큼의 mini-slot으로 나뉜다. [그림 6]은 이와 같은 MAC의 동작을 나타낸다.

CO-MAC에서 하나의 CR 노드가 전송을 시도하면 랜덤하게 하나의 채널(예를 들면, i 번 채널)을 선택하여 센싱한다. 해당 채널에서 다른 기기가 감지되면 보고 단계에서 제어 채널의 i 번째 mini-slot에 impulse 신호를 전송하여 다른 CR 노드들에게 알린다. 그런데 각 노드가 무작위로 하나의 채널을 선택하여 센싱할 경우에 여러 CR 노드가 하나의 채널을 동시에 센싱할 수 있고 그 결과 센싱되지 않는 채널도 생길 수 있다. 이러한 문제를 최소화하기 위해, 협상 단계에서 채널 접근을 위해 경쟁할 때 자신이 센싱하는 채널 정보를 다른 CR 노드들에게 알림으로써 채널의 중복 선택 가능성을 최소화한다. 결국 CR 노드의

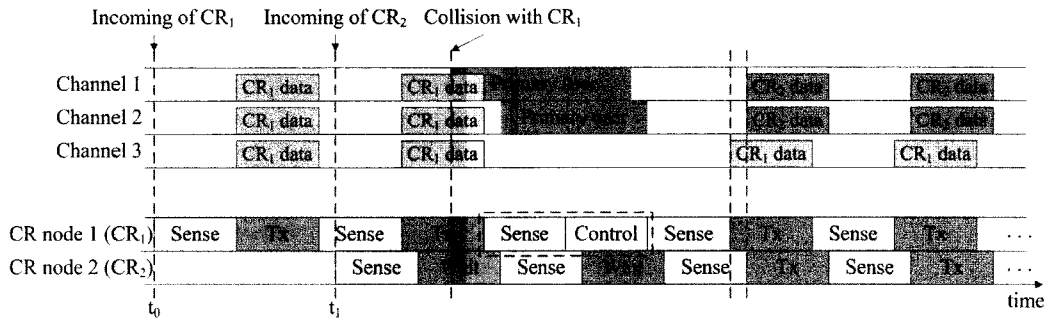
수가 전체 채널의 수보다 많으면 각 CR 노드는 단 하나의 채널만 센싱해도 전체 채널의 센싱 결과를 알 수 있어서 센싱 부담을 크게 줄일 수 있다는 장점을 가진다. 그러나 중앙 제어 노드가 없기 때문에 시간 동기를 맞추기 위한 부담이 있다.

3-2-2-3 FOSA-MAC^[14]

기존 CSMA/CA 기반의 CR MAC 프로토콜은 공평성(fairness)을 보장하기 위해 경쟁에 이긴 노드의 전송 시간을 제한한다. 이는 전체 채널 사용 시간 중 RTS/CTS의 전송 및 backoff에 소요되는 시간의 비율이 늘어나기 때문에 채널 사용 효율이 떨어지는 단점이 있다. FOSA(Fair Opportunistic Spectrum Access)-MAC은 이러한 단점을 극복하기 위해 제안되었으며, PU의 전송에 따라 채널의 상황이 빠르게 변화하는 환경에서 CR 노드들 사이의 공평성을 보장하면서도 채널 사용 효율을 높인다. 이 MAC 프로토콜은 두 개의 송수신기를 사용하여 하나는 제어 채널에서 제어 정보를 교환하고, 나머지 하나는 OFDM 기법을 통해 가용 채널을 묶어서 패킷을 전송한다.

[그림 7]과 같이 CR 노드들은 제어 상태(control state), 센싱 상태(sense state), 그리고 전송 상태(transmission state)의 세 가지 상태를 가질 수 있다.

전송을 원하는 CR 노드는 센싱 상태에서 모든 채널을 센싱하여 가용 채널 정보를 파악한다. 그 후 제어 상태로 전환하여 제어 채널을 통해 가용 채널 중 선택한 채널에서 데이터를 전송하겠다는 다른 CR 노드들에게 알리고 선택한 채널로 이동한다. 이동한 채널에서 이 CR 노드는 센싱 상태로 전환하여 모든 채널을 다시 센싱 해 본 후 자신이 사용할 채널이 여전히 비어 있다면 전송 상태로 전환하여 패킷을 전송한다. 그 후 다시 센싱 상태로 전환하여 사용 중인 채널에 PU가 출현했는지 여부를 센싱한다. 이와 같이 한번 전송을 시작한 CR 노드는 사용 중인 채널에 PU가 나타날 때까지 계속 센싱 상태와 전송 상태를



[그림 7] FOSA-MAC 동작 예

반복적으로 전환하며 그 채널을 사용할 수 있다. 만약 사용 중인 채널 중 하나의 채널만이라도 PU의 출현이 감지된다면 제어 상태로 전환하여 사용 중인 모든 채널을 비워 주고 다른 채널로 이동한다.

전송에 사용하고 있는 채널의 수가 많은 CR 노드는 그만큼 PU와의 충돌 가능성이 커지기 때문에 채널을 오래 사용할 수 없다. PU와의 충돌로 채널을 비워 준 CR 노드는 센싱 상태와 제어 상태를 거쳐 새로운 전송을 시작해야 하므로 이 시간동안 다른 노드들이 채널을 사용할 수 있는 기회를 가질 수 있어 공평성이 자연스럽게 보장된다. 또, FOSA-MAC은

새로운 CR 노드에게 채널을 더욱 많이 사용할 수 있도록 기회를 주는 FCS(Fast Catch Strategy) 기법을 제공하므로 더욱 빨리 공평성을 보장할 수 있다.

3-3 CR MAC 프로토콜의 특성 비교

이 글에서 다른 CR MAC 프로토콜의 특성을 중앙 집중형/분산형, 단독 채널/복수 채널, 제어 채널의 유무, CR 노드의 송수신기 수, CR 통신망 영역에 상대적인 PU의 전송 범위, 그리고 채널 접근 방식의 항목에서 비교하였다. <표 1>에 그 결과를 정리하였다.

<표 1> CR MAC 프로토콜의 특성

Protocol name	Centralized/ Distributed	Single-channel/ Multi-channel	Dedicated control channel	Number of transceiver	Transmission range of PU	Channel access
IEEE 802.22	Centralized	Single-channel	No	One	-	Time-Slotted
IEEE 802.11h	Centralized	Single-channel	No	One	-	Random Access
Chen의 MAC	Centralized	Single-channel	No	One	Large	Time-Slotted
Thoppian의 MAC	Distributed	Multi-channel	Yes	One	Small	Random Access
HC-MAC	Distributed	Multi-channel	Yes	One	Small	Random Access
CREAM-MAC	Distributed	Multi-channel	Yes	One	Small	Random Access
SCA-MAC	Distributed	Multi-channel	Yes	One	Small	Random Access
Nan의 MAC	Distributed	Multi-channel	Yes	Two	Small	Random Access
CO-MAC	Distributed	Multi-channel	Yes	Two	Large	Time-Slotted
FOSA-MAC	Distributed	Multi-channel	Yes	Two	-	Random Access

IV. 결 론

CR MAC 프로토콜은 PU의 주파수 사용 현황을 파악하기 위해 채널 센싱을 스케줄하고, 센싱 결과에 따라 사용할 채널을 선택하며, 사용 중인 채널 상에서 PU가 전송을 시작한 경우 다른 채널로 이동하는 기법을 제공한다. 이 글에서는 현재까지 제안된 각종 CR MAC 프로토콜을 채널 센싱 스케줄링, 채널 선택, 채널 전환을 중심으로 살펴보고, 각 프로토콜의 특성과 장·단점을 알아보았다. 이에 관한 향후 연구 과제는 다음과 같이 정리할 수 있다.

1. 현재 다양한 CR MAC 프로토콜이 제안되어 있으나 각기 장단점이 다르므로 MAC 프로토콜 간의 정확한 성능 비교가 필요하고, 이를 위해 CR MAC 프로토콜의 성능 평가 척도의 개발이 선행되어야 한다.
2. 현재의 CR 통신망 표준화 작업은 주로 중앙 집중형 CR 통신망을 대상으로 이루어지고 있다. 확장성이 특성이 뛰어난 갖는 분산형 CR 통신망의 표준화를 위해서는 앞선 연구를 바탕으로 제어 채널 관리 기법, 무선 자원 관리 기법에 대한 추가적인 연구가 필요하다.
3. IEEE 802.22, IEEE 802.11h와 같은 CR 통신망 표준은 현재 구조와 절차를 정의하는 수준이기 때문에 이러한 통신망 표준의 성공적인 도입을 위해서는 효율적인 침묵 기간 관리 기법, 백업 채널 관리 기법 등에 대한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

[1] S. Haykin, "Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 23, no. 2, pp. 201-220, Feb. 2005.

[2] I. F. Akyildiz, W. Lee, M. C. Vuran, and S. Moshayyeh, "NeXt generation/dynamic spectrum access/

cognitive radio wireless networks: A survey", *Computer Networks*, vol. 50, no. 13, pp. 2127-2159, Sep. 2006.

- [3] J. So, N. H. Vaidya, "Multi-channel MAC for ad hoc networks: Handling multi-channel hidden terminals using a single transceiver", in *Proc. ACM MobiHoc 2004*, Tokyo, Japan, pp. 222-233, May 2004.
- [4] H. Nan, T. Hyon, and S. Yoo, "Distributed coordinated spectrum sharing MAC protocol for cognitive radio", in *Proc. IEEE DySPAN 2007*, Dublin, Ireland, pp. 240-249, Apr. 2007.
- [5] IEEE 802.22 draft standard, "IEEE P802.22/D1.0 draft standard for wireless regional area networks part 22", 2008.
- [6] IEEE 802.11h standard, "IEEE 802.11, Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications, amendment 5: Spectrum and transmit power management extensions in the 5 GHz band in Europe", 2003.
- [7] J. Chen, M. Zhao, J. Tian, and S. Li, "A qos MAC protocol for cognitive PMP networks with rapid changes of spectrum opportunities", in *Proc. IEEE VTC Spring 2008*, Marina Bay, Singapore, pp. 1661-1665, May 2008.
- [8] M. Thoppian, S. Venkatesan, and R. Prakash, "CSMA-based MAC protocol for cognitive radio networks", in *Proc. IEEE WoWMoM 2007*, Helsinki, Finland, pp. 1-8, Jun. 2007.
- [9] J. Jia, Q. Zhang, and X. Shen, "HC-MAC: A hardware-constrained cognitive MAC for efficient spectrum management", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 26, no. 1, pp. 106-117, Jan. 2008.
- [10] Y. S. Chow, H. Robbins, and D. Siegmund, *Great Expectations: The Theory of Optimal Stopping*, Hough-

ton Mifflin Company, 1971.

[11] H. Su, X. Zhang, "CREAM-MAC: An efficient cognitive radio-enabled multi-channel MAC protocol for wireless networks", in *Proc. IEEE WoW-MoM 2008*, Newport Beach, CA, USA, pp. 1-8, Jun. 2008.

[12] A. C. Hsu, D. S. L. Wei, and C. C. J. Kuo, "A cognitive MAC protocol using statistical channel allocation for wireless ad-hoc networks", in *Proc. IEEE WCNC 2007*, Hong Kong, pp. 105-110, Mar.

2007.

[13] H. Su, X. Zhang, "Cross-layer based opportunistic MAC protocols for QoS provisionings over cognitive radio wireless networks", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 26, no. 1, pp. 118-129, Jan. 2008.

[14] Z. Ma, Z. Cao, and W. Chen, "A fair opportunistic spectrum access (FOSA) scheme in distributed cognitive radio networks", in *Proc. ICC 2008*, Beijing, China, pp. 4054-4058, May 2008.

≡ 필자소개 ≡

이 동 현



2005년: 연세대학교 전기전자공학부 (공학사)
 2007년: 연세대학교 (공학석사)
 2007년~현재: 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 박사과정
 [주 관심분야] CR 통신망, 무선 자원 관리, 무선 메쉬 통신망 등

전 화 숙



1983년: 서울대학교 컴퓨터공학과 (공학사)
 1985년: 서울대학교 컴퓨터공학과 (공학석사)
 1989년: 서울대학교 컴퓨터공학과 (공학박사)
 1989년~1999년: 한성대학교 컴퓨터공학과 부교수
 1999년~현재: 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 교수
 [주 관심분야] CR 통신망, Cooperative 통신망, 이동통신, 무선 자원 관리 등

하 기 응



2008년: 중앙대학교 컴퓨터공학과 (공학사)
 2008년~현재: 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 석사과정
 [주 관심분야] CR 통신망, Ad-Hoc 라우팅 등

정 동 근



1983년: 서울대학교 제어계측공학과 (공학사)
 1985년: 서울대학교 제어계측공학과 (공학석사)
 1993년: 서울대학교 제어계측공학과 (공학박사)
 1986년~1990년: 데이콤 연구원
 1994년~1997년: 신세기통신 연구팀장
 1997년~현재: 한국외국어대학교 전자공학과 교수
 [주 관심분야] CR 통신망, Cooperative 통신망, 이동통신, 무선 자원 관리 등