

# 주파수 도메인 채널접근: 최신 연구동향 및 효율적인 다이버시티 활용 프로토콜

이수철, 박세용, 김종권  
서울대학교

## 요약

최근 멀티미디어 데이터 사용의 증가에 따라 무료로 고속의 데이터 송수신이 가능한 무선랜에 대한 관심이 증가하였다. OFDM기술은 높은 주파수 이용효율과 용이한 구현장점으로 무선랜을 포함한 많은 표준에서 채택하고 있는 물리층 데이터 전송기술이다. 그러나 물리적으로 고속의 데이터전송이 가능해짐에 따라 MAC프로토콜 효율성에 대한 문제가 지적되어 왔으며 최근 이를 해결하기 위한 주파수 도메인 채널경쟁 방법을 도입한 연구들이 발표되었다. 본고에서는 OFDM의 특징을 활용한 주파수 도메인 채널접근 방법에 대한 최신 연구동향을 살펴보고 효율적 다이버시티 활용 주파수 도메인 채널접근 프로토콜인 D-Fi를 소개한다. D-Fi는 블룸필터를 활용하여 프로토콜 효율성 문제를 해결하는 한편 지능적으로 다이버시티를 활용하게 되어 기존방법에 비해 1.5배의 성능을 낸다.

## I. 서론

최근 스마트폰을 중심으로 멀티미디어 데이터 사용량의 급격한 증가에 따라, 무료로 고속의 데이터 송수신이 가능한 Wi-Fi(무선랜)망[1]에 대한 관심이 증가하였다. 무선랜은 IEEE 802.11 WG를 중심으로 표준화가 되었으며, 최근 MIMO(Multiple Input Multiple Output)기술이 표준에 포함되면서 연구측면에서 새로운 국면을 맞이하였다. 근래에는 우리는 언제 어디에 있던 가까이서 무선랜이 동작하는 공간을 찾아 볼 수 있을 정도가 되었다.

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식은 유·무선채널에서 고속 데이터 전송에 적합한 방식으로 최근 활발히 연구되고 있다. OFDM은 상호 직교성을 갖는 복수의 반송파를 사용하므로 주파수 이용효율이 높아지고, 송·수신단에서 이러한 복수의 반송파를 변·복조하는 과정이 FFT를 사용하여 고속으로 구현될 수 있다. 이렇듯 OFDM 방식이 고속

의 데이터 전송에 적합하기 때문에 IEEE 802.11a/g/n/ac 등의 고속 무선랜, Mobile WiMAX (IEEE 802.16)등의 최신 무선통신 기술의 표준방식으로 채택되었다[2].

현재 무선랜 표준은 MAC계층프로토콜 경쟁기반 분산 프로토콜인 DCF(Distributed Coordination Function)를 채택하고 있다. DCF에서는 데이터를 전송하기에 앞서 BEB(Binary Exponential Backoff)과정을 통해 랜덤 한 timeslot시간을 기다려야 한다. 이를 통해 동시에 여러 개의 노드가 동시전송을 함으로써 발생하는 데이터의 충돌을 회피할 수 있게 되었으나 불가피하게 기다려야 하는 시간이 생기게 되었다. 이는 오버헤드 측면에서 살펴볼 때 비효율성을 야기하며 PHY 기술의 향상으로 데이터전송률이 증가함에 따라 상대적으로 더욱 오버헤드의 비중이 커지게 되었다[3][4].

최근 OFDM기술을 활용하여 DCF프로토콜에서 시간 도메인(Time domain)으로 수행되는 백오프를 주파수 도메인(Frequency domain)으로 마이 그레이션 하는 연구가 진행되었다[4][5][6][7]. 랜덤하게 선택된 timeslot만큼 기다리는 대신 한 개의 OFDM 심볼(Symbol)시간 안에 백오프과정이 진행되어 프로토콜 오버헤드를 상당부분 경감시켰다. 기존의 시간 도메인 백오프과정이 IEEE 802.11n표준을 기준으로 대략 수백 마이크로 초의 시간이 걸리는 반면 주파수 도메인 백오프 과정은 수십 마이크로초가 걸린다. 이는 상용 무선랜(802.11n)기준으로 MAC계층 프로토콜 효율성이 30%수준에서 70%수준으로 개선되는 효과를 얻게 된다.

본고에서는 최근 학계에서의 OFDM의 특징을 활용한 주파수 도메인 채널접근기술의 연구동향[4][5][6]을 살펴본다. 이를 기반으로 제안하는 프로토콜인 D-Fi[7]를 살펴보고 기존 기술과의 비교우위에 있는 사항들을 짚어본다. D-Fi는 기존의 연구들에서 OFDM 서브캐리어를 단순한 시간 도메인 timeslot 대신 사용한 것과 달리 블룸필터(Bloom Filter)[8]를 사용하여 채널경쟁을 수행한다. 블룸필터를 사용함으로써 별도의 채널상태 측정과정 없이 무선랜 노드들의 채널상태를 측정할 수 있게 되어 다이버시티를 활용할 수 있어 기존의 주파수 도메인 채널경쟁방법에 비해 1.5배, IEEE 802.11n 무선랜 표준에 비해 3배

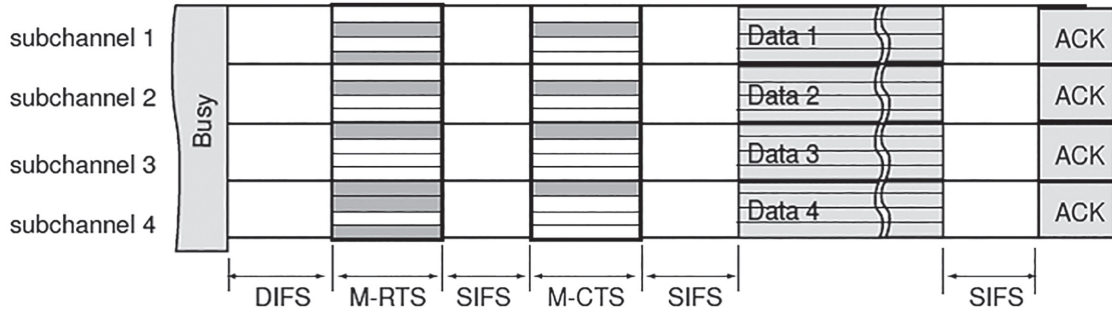


그림 1. FICA의 MAC프로토콜(4개의 서브채널) [4]

이상의 성능을 낸다.

본고의 구성은 다음과 같다. 1장의 서론에 이어 2장에서는 OFDM기술을 활용한 주파수 도메인 채널접근 기법들의 연구 동향을 정리한다. 3장에서는 제안하는 D-Fi프로토콜을 기존의 방법들과의 차이점을 중심으로 살펴본다. 4장에서 제안하는 프로토콜과 기존 방법들의 실험 및 시뮬레이션 결과를 기술하고, 마지막 5장에서 본고를 맺는다.

## II. 주파수 도메인 채널접근 연구동향

MAC계층 프로토콜의 효율성을 증가시키는 방법은 근본적으로 3가지 방법론에 의하여 실현될 수 있다.

첫째, 채널경쟁 자체를 짧은 시간에 완료하는 방법을 사용할 수 있다. 2장에서 소개할 연구들과 제안하는 D-Fi프로토콜은 모두 여러 개의 timeslot을 기다리는 대신 한 개의 OFDM 심볼시간 안에 백오프과정을 수행하므로 이 방법을 모두 포함하고 있다. 둘째, 채널화(Channelization)를 사용할 수 있다. 채널화를 사용할 경우 전체 채널에 데이터를 보내는 대신 대역폭이 작은 서브채널을 사용하여 데이터를 전송하게 되므로 상대적으로 긴 시간 동안 데이터를 전송하게 되어 MAC 계층 프로토콜의 효율성이 증대되게 된다. 마지막으로 채널상태를 고려하여 각 서브채널 별로 최적의 MCS(Modulation and Coding Scheme)를 사용하도록 하는 방법이 있을 수 있다. 이는 주파수 다이버시티를 이용하는 것과 일맥상통한다.

먼저 주파수 도메인 채널접근 방법을 통해 MAC계층 프로토콜의 효율성을 증대시킨 기존의 연구인 FICA [4], Back2F [5], REPICK [6]을 살펴본다. 제안하는 프로토콜인 D-Fi [7]를 살펴보고 기존기술과의 비교우위에 있는 사항들을 짚어본다.

### 1. FICA [4]

〈그림 1〉에 FICA의 MAC프로토콜을 도식하였다. 그림과 같이 FICA에서는 무선랜의 20MHz 채널<sup>1</sup>을 OFDM기술을 통해 여러 개의 서브채널로 채널화(Channelization)한다. 각 서브채널은 여러 개의 서브캐리어로 구성되게 되며, 노드들은 M-RTS/M-CTS를 이용한 채널경쟁을 통해 서브채널을 무선채널이용의 단위로 사용하게 된다. 서브채널을 사용하기 위해 노드는 서브채널을 구성하는 서브캐리어 중 한 개를 랜덤하게 선택하여 신호를 송신한다. 〈그림 1〉의 서브채널1에서는 음영으로 표기된 2번째 그리고 4번째 서브캐리어에 신호가 송신되었음을 보여주고 있다. FICA AP는 신호가 송신된 서브캐리어 중 하나를 선택, 응답신호를 송신하게 된다. 해당 서브캐리어에 신호를 송신하였던 노드(들)는 해당 서브캐리어를 포함한 서브채널을 사용할 권한을 얻는다.

이처럼 시간도메인에서 랜덤크기의 timeslot을 선택하여 기다리는 대신 랜덤순서의 서브캐리어를 선택함으로써 경쟁을 수행하게 되므로 채널경쟁에 소요되는 시간이 M-RTS와 M-CTS를 송수신하는데 들어가는 시간으로 감소된다. 이는 실제로 한 쌍의 OFDM심볼의 송수신으로 구현되는데, FICA논문 에 따르면 512포인트 FFT를 기준으로 각 25.6마이크로초가 걸린다. 수백 마이크로초가 걸리는 무선랜 표준의 DCF와 비교할 때 매우 작은 시간이라고 볼 수 있다.

여기서 노드는 최대  $C_{max}$  개의 서브채널을 선택하여 M-RTS를 송신하게 된다. 큰  $C_{max}$  값을 선택하게 되면 서브채널의 경쟁이 커지게 되어 충돌<sup>2</sup>확률이 증가하게 된다.  $C_{max}$  값을 조절하기 위해서 FICA에서는 AIMD(Additive Increase Multiplicative Decrease)와 유사한 방법을 사용한다. 노드가 p%의 충

1 IEEE 802.11n에서는 채널본딩(Channel bonding)을 통해 40MHz를 사용하며, IEEE 802.11ac에서는 최대 160MHz채널을 사용할 수 있으나 여기서 편의상 20MHz의 단일 무선랜 채널을 가정한다.

2 FICA AP가 선택한 서브캐리어에 M-RTS신호를 송신한 노드의 개수가 20이상인 경우 여러 개의 노드가 동시에 해당 서브채널의 사용을 인가 받은 것으로 판단하여 동시에 데이터를 전송하게 된다.

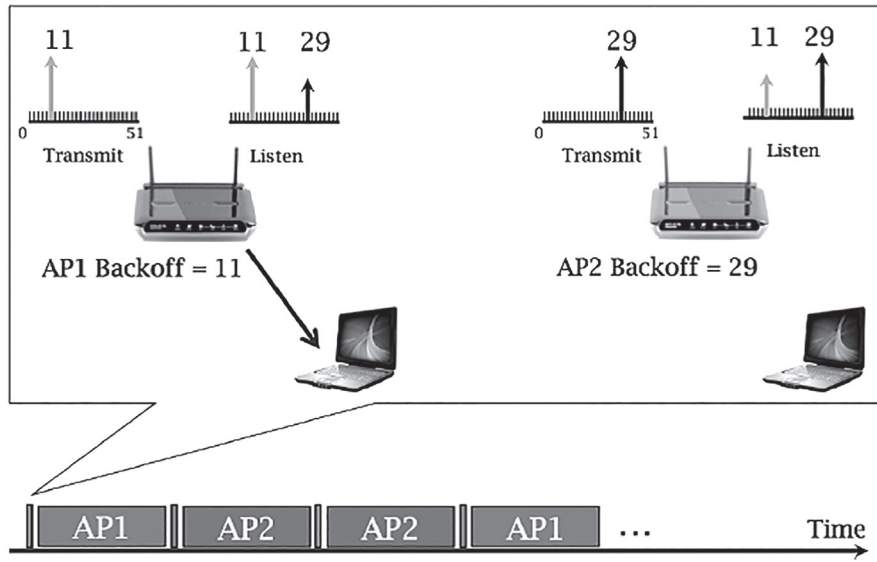


그림 2. Back2F의 주파수 도메인 채널경쟁 [5]

돌확률을 감지하면,  $C_{max}$  값을  $p\%$ 만큼 감소시키며, 모든 서브 채널에서 충돌 없이 데이터전송이 성공하면  $C_{max}$  값을 1증가 시키게 되며 이를 주파수 도메인 백오프(Frequency Domain Backoff)라고 한다.

## 2. Back2F [5]

〈그림 2〉에 Back2F의 주파수 도메인 채널경쟁 프로토콜을 도식하였다. Back2F는 앞서 소개한 FICA와 달리 채널화를 사용하지 않으므로 무선랜 표준과 동일하게 20MHz채널 전체를 채널접근의 기본단위로 사용하게 된다. 이 경우 앞서 소개한 채널화에 의한 성능이득을 취할 수 없으나 프로토콜의 간단한 변형만으로 채널경쟁의 이득을 최소화하였다는 점에서 공헌을 찾을 수 있다.

〈그림 2〉에서는 AP1과 AP2가 동시에 데이터를 전송하고자 한다. AP는 랜덤크기의 timeslot을 선택하는 대신 OFDM무선랜 표준의 52개의 서브캐리어 중 랜덤하게 하나를 골라 채널 경쟁신호를 동시에 전송한다. 위 예에서는 AP1은 11번째 서브캐리어에 신호를 전송하였고, AP2는 29번째 서브캐리어에 신호를 전송하였다. 기존의 관례대로 작은 수를 택한 AP1이 경쟁에서 이기는 방법으로 동작한다. 여기서 주목할만한 사실은 Back2F방법은 FICA에서는 기존의 AP가 채널경쟁의 승리자를 선택하는 방식으로 동작하는 것과 달리 직접 AP1이 자가신호(AP1가 보낸신호)와 AP2가 보낸 신호를 동시에 수신<sup>3</sup>하므로 기존 무선랜 표준 DCF의 분산방법을 유지할 수 있다는 장점을 가

3 이해를 돕기 위해 신호의 상대적 세기를 고려하여 화살표의 크기와 음영색이 도식되었다.

진다.

그러나 FICA와 마찬가지로 여러 개의 AP가 동시에 같은 서브캐리어를 선택할 가능성이 있어 Back2F에서는 다중라운드 주파수 도메인 채널 경쟁을 옵션으로 선택하고 있다. 예를 들어 11번째 서브캐리어를 선택한 AP들끼리 추가적인 주파수 도메인 채널경쟁을 수행하도록 하여 충돌확률을 낮춘다. Back2F는 문에서는 통상적인 무선랜 환경에서 2번의 주파수 도메인 채널 경쟁이면 매우 작은 확률의 충돌을 예상할 수 있음을 분석을 통하여 보여주고 있다.

Back2F에서는 주파수 도메인 채널경쟁 외에 배치를 이용한 전송기법(표준의 Aggregation과 유사) 등을 채택하고 있으나 본고에서 다루고자 하는 주제와는 다소 차이가 있어 생략한다.

## 3. REPICK [6]

〈그림 3〉은 REPICK의 채널경쟁을 도식하고 있다. 기본적인 주파수 도메인 채널경쟁방법은 Back2F와 유사하나 ACK을 피기백(Piggyback)하기 위한 몇 가지 특징이 추가로 구현되어 있다. 일반적으로 ACK패킷은 송신자와 수신자가 필드 값으로 포함되어 있으나, 주파수 도메인 경쟁에서는 한 개의 OFDM심볼만으로 채널경쟁에 필요한 신호의 송수신을 수행하므로 이를 구현하기가 용이하지 않다. REPICK논문에서는 이를 다음과 같은 방법으로 해결한다. 전체 서브캐리어를 식별(identification) 서브캐리어와 경쟁 서브캐리어로 구분하여 사용한다. 노드는 식별 서브캐리어 중 하나를 할당 받아 신호가 자신에게 송신되었는지를 식별하는데 사용한다. 예를 들어 〈그림 3〉에서 R노드는 ACK/43신호를 송신하기 위해 S의 식별자 서브캐리어와

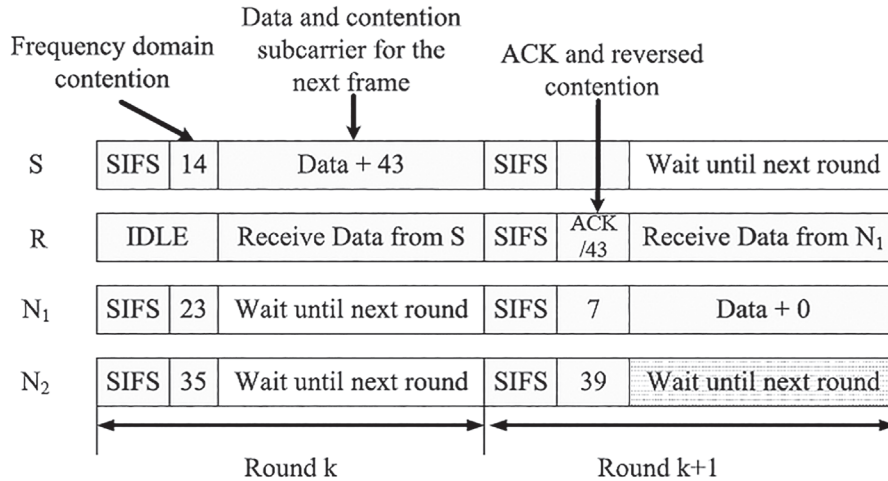


그림3. REPICK의 주파수 도메인 채널경쟁 및 ACK피기백 (Piggyback) [6]

43번째 경쟁 서브캐리어에 신호를 송신하게 된다. S의 식별자가 포함되어 있으므로 S노드는 R노드가 자신의 데이터에 대한 ACK을 송신하였음을 알 수 있으며, R노드는 K+1번째 채널 경쟁에 43번째 경쟁 서브캐리어를 선택함으로써 참여하게 된다.

위 <그림 3>에서는 43번째 경쟁 서브캐리어를 선택한 것은 R노드이지만 실제 보낼 데이터를 가진 것은 S노드이다 (Data + 43을 보낸 것을 참조하라.). 이렇듯 S노드의 채널경쟁을 R(Receiver)노드가 대행하여 수행하므로 이를 REPICK(Reversed contention and Piggybacked ACK)이라고 명명하였다.

지금까지 기존의 주파수 도메인 채널경쟁 방법들에 대하여 살펴보고 기존기술과의 비교우위에 있는 사항들을 짚어본다.

### Ⅲ. 다이버시티를 활용할 수 있는 주파수 도메인 채널접근

#### 1. 개요

다이버시티를 활용하기 위해서는 채널상태의 측정이 선행되어야 한다. 이를 위해서 제안하는 D-Fi(Diversity Aware Wi-Fi)프로토콜에서는 OFDM기반으로 구현된 블룸필터(Bloom Filter)[8]를 사용한다. D-Fi는 FICA와 유사하게 채널화를 사용하여 서브채널을 채널접근의 단위로 사용한다. D-Fi는 17개의 서브캐리어가 채널 접근의 기본 단위인 한 개의 서브채널을 구성한다 (이 경우 서브채널의 대역폭은 대략 1.4MHz이다). 17개의 서브캐리어 중 16개는 데이터전송에, 한 개는 데이터전송 중 채널상태를 계속적으로 측정하기 위한 Pilot으로 사용된다.

결과적으로, 20MHz밴드는 통상의 무선랜 동작환경에서 서로 주파수 선택적(Frequency Selective)인 총 14개의 서브채널로 채널화된다.

<그림 4>와 같이 D-Fi는 채널경쟁 및 채널측정을 위하여 CRQ/CRP<sup>4</sup>프레임교환을 이용한다. 노드들은 채널이 DIFS시 간동안 idle하면, CRQ프레임을 동시에 전송한다. CRQ프레임을 보낼 때, 각 노드들은 채널상태가 좋을 가능성이 높은 K개의 서브채널을 선택하여, 각각의 서브채널에 자신의 시그니처(Signature)를 전송한다. 결과적으로 하나의 서브채널에는 해당 서브채널을 사용하고자 하는 노드들의 시그니처가 합성되어 AP로 전송된다.

AP는 수신 된 CRQ프레임(시그니처)을 통해 노드들의 업링크 채널상태를 측정 한다. 측정결과를 가지고, AP는 미리 정해진 채널 할당정책에 의거 서브채널들을 노드들에게 할당하고 이는 CRP프레임을 통해 브로드캐스팅 된다. CRP프레임은 채널상태를 고려한 데이터전송률정보를 포함한다.

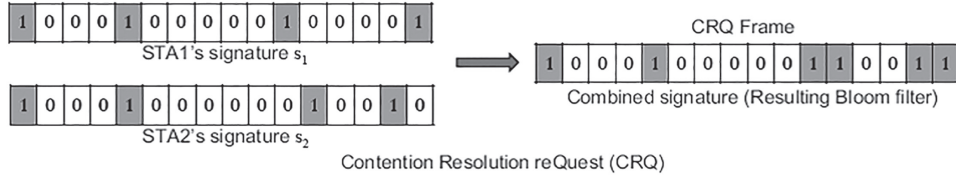
#### 2. 채널경쟁과 채널상태 측정

이 절에서는 채널경쟁과 채널상태 측정에 사용되는, 시그니처, CRQ/CRP프레임, 채널상태 측정방법에 대하여 구체적으로 기술한다.

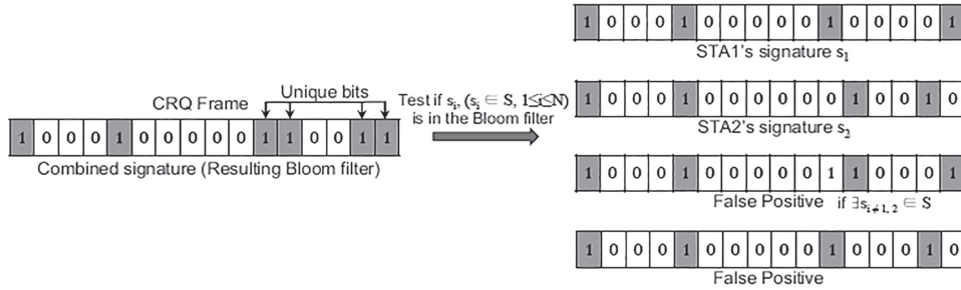
##### 2.1 시그니처

시그니처는 16개의 이진수로 구성되며 유일한 시그니처가 각 노드에게 할당된다. 시그니처는 16개의 이진수배열을 4개의 연

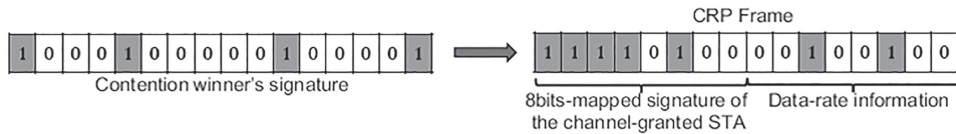
4 D-Fi프로토콜에서 CRQ/ CRP는 FICA의 M-RTS/ M-CTS에 대응하는 것으로 표준의 RTS/CTS와 유사한 역할을 수행하며 채널측정에 이용된다.



(a) Insertion of two signatures in a subchannel (Contention Resolution reQuest).



(b) Membership test for the resulting Bloom filter (CRQ decoding); two false positives occurred.



(c) The channel allocation result is conveyed via the CRP frame.

그림 4. D-Fi의 블룸필터 기반 주파수 도메인 채널경쟁 프로토콜

속된 이진수로 구성 된 4개의 부분배열로 분할하고 각각의 부분배열에서 1개의 비트만 골라 “1”로 나머지는 “0”으로 세팅되게 된다. 따라서 총 256개의 시그니처가 생성될 수 있다.

## 2.2 CRQ 프레임

D-Fi에서는 서브채널 경쟁과 상태 측정을 동시에 하기 위해

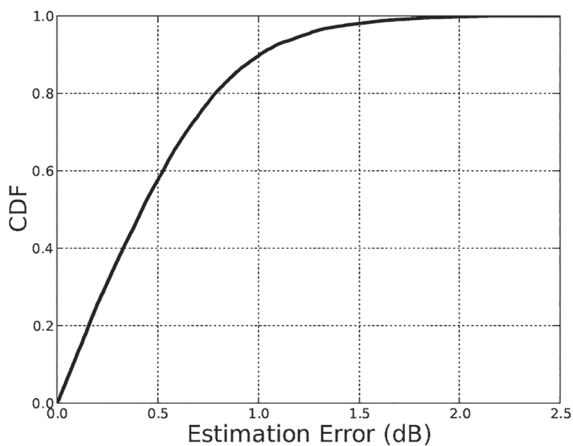


그림 5. 채널 상태 측정에러(CDF)

블룸필터를 사용한다. 각 서브채널은 각 한 개의 블룸필터를 사용하므로 한 개의 CRQ프레임전송에 총 14개의 블룸필터가 사용된다. 시그니처가 “1000 1000 0010 0001”인 노드1, “1000 1000 0001 0010”인 노드2를 생각하자. 만약 두 노드가 같은 서브채널을 사용하고자 한다면 시그니처를 CRQ프레임에 송신할 것이다. 그 결과 생성되는 블룸필터는 “1000 1000 0011 0011”이 될 것이다(그림 4-a).

AP는 노드가 해당 서브채널을 사용하길 원하는지 알기 위해 수신된 CRQ프레임의 각각의 블룸필터에 멤버십 테스트를 수행한다. 멤버십 테스트를 하는 동안 AP는 추가적인 오버헤드 없이 노드1과 노드2의 업링크 채널 상태를 측정한다. 본고에서는 앞으로 블룸필터의 멤버십 테스트를 “CRQ디코딩”이라고 기술한다(그림4-b).

CRQ디코딩과정에는 두종류의 모호성이 존재한다. 이는 물리적 에러와 논리적 에러이다. 블룸필터의 한 개의 비트는 OFDM 시스템에서의 한 개의 서브캐리어이므로 노드는 시그니처를 삽입하기 위하여 몇몇 서브캐리어에 시그널을 보내게 된다. 실제 환경에서는 OFDM시스템의 서브캐리어 간 분할이 완벽하게 구

현되지 않아 약간의 오차를 포함한다. 따라서 시그널이 삽입된 서브캐리어의 인접 혹은 주변 서브캐리어들은 이른바 “Signal Power Leakage”라고 불리는 현상을 겪게 되는데 본고에서는 이를 물리적 에러라고 칭한다. 물리적 에러는 신호의 존재유무를 결정하는 임계값을 적절히 선택하는 방법에 의해 무시할 수 있는 수준으로 낮출 수 있다.

논리적 에러는 블룸필터의 내재적 특성 때문에 발생하는 것으로, CRQ디코딩과정에서 노드가 특정 서브채널의 사용을 요청하지 않았음에도 불구하고 해당 서브채널의 사용을 요청한 것으로 해석하는 경우를 의미한다. <그림 4-b>에서, AP는 결과로 생성된 해당 블룸필터의 결과값 “1000 1000 0011 0011”을 가지고 노드1과 노드2가 해당 서브채널을 요청하였음을 알 수 있다. 하지만, “1000 1000 0001 0001” 또는 “1000 1000 0010 0010”을 시그니처로 할당 받은 노드들도 그 서브채널을 요청하였다고 잘못 해석할 수 있다. 본고에서는 이를 논리적 에러라고 칭한다.

모호성을 해결하기 위해 [7]에서는 두 가지 방법을 제안하였다. 이는 기계학습방법과 MAB(Multi-armed Bandit Framework) [9]에 기반한 분산채널탐색 알고리즘으로 본고에서 다루기에는 방대한 내용이므로 생략한다. 관심 있는 독자는 [7]을 참고하라.

### 2.3 CRP 프레임

AP는 CRQ프레임을 디코딩하여, 서브채널 별로 경쟁에서 이긴(AP가 서브채널을 할당함) STA들의 시그니처와 채널상태측정결과를 바탕으로 STA이 데이터를 전송할 때 사용해도 좋은 만한 데이터전송을 정보를 CRQ프레임을 통해 브로드캐스팅한다. 총16개의 비트 중 8개는 시그니처, 나머지 8개는 데이터전송을 정보를 보내는데 사용한다<그림 4-c>.

### 2.4 채널상태 측정

AP는 노드가 CRQ프레임을 전송하여 채널 경쟁을 할 때, STA들의 업링크 채널상태를 서브채널단위로 측정한다. 시그니처가 “1000 1000 1000 1000”인 노드1, “1000 1000 1000 0100”인 노드2가 특정 서브채널을 사용하기를 원한다고 가정하자. CRQ프레임의 해당 서브채널에는 “1000 1000 1000 1100”의 신호가 AP에 수신될 것이다. 마지막 4비트인 “1100”은 2개의 “1”을 가진다. AP는 할당된 모든 시그니처를 알고 있기 때문에 마지막 4비트의 2개의 “1”중에서 첫 번째 “1”은 노드1이, 두 번째 “1”은 노드2가 시그널을 삽입하였음을 추론할 수 있다.

노드들이 서브채널에 CRQ신호를 보내기 위한 에너지가 일정하다면 CRQ프레임을송신할 때 한 개의 서브채널에 사용된

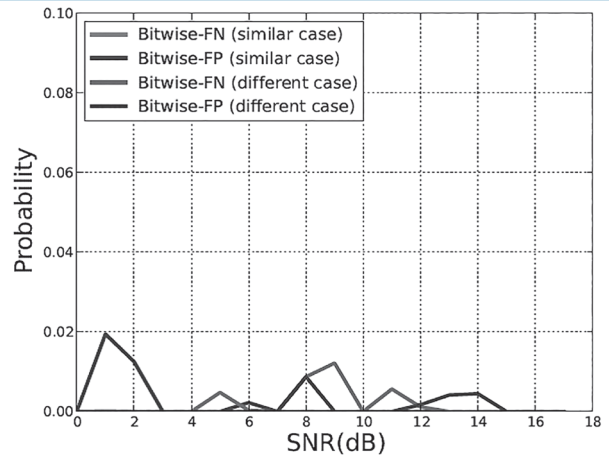


그림 6. 서브캐리어 신호처리 정확도

에너지의 총합은 해당 노드가 서브채널에 데이터를 송신할 때에 사용할 에너지의 총합과 같다. CRQ프레임을 송신할 때 전체 서브채널의 에너지가 시그니처를 구성하는 4개의 “1”비트에 균등하게 분포되고, 이 서브채널의 에너지는 무선채널을 통해 AP에 수신된다. 따라서, AP는 하나의 노드만이 신호를 만들어낸 비트의 에너지를 측정하여 해당 노드 해당서브채널에 대한 CRQ프레임의 수신에너지를 측정할 수 있다. 이로부터 AP는 해당 서브채널에 동일한 노드가 데이터를 보냈을 때 수신하게 될 에너지의 총합, 곧 데이터의 수신SNR(Signal to Noise Ratio)을 예측할 수 있다<그림 4-a, b>.

우리는 제안하는 채널상태 측정방법이 정확함을 실험을 통해 검증하였다. 결과에 의하면 무선랜이 통상 동작하는 실내환경에서 대부분의 경우(90%이상) 채널상태측정 에러는 1dB이하임을 확인하였다.

## IV. 성능평가

### 1. 구현 및 실험

우리는 GNU소프트웨어라디오(SDR)[10]코드로 동작하는 4대의 N210 USRP(Universal Software Radio Peripheral - XCVR2450 도터보드)노드를 이용한 테스트베드에 제안하는 D-Fi를 구현하였다. 우리는 표준 밴드인 2.4G 혹은 5GHz대역에서 실험을 수행하였다. CRQ/ CRP프레임 구현을 위해 서브캐리어별 BAM (Binary Amplitude Modulation)을 사용하였다. 서브캐리어 신호의 신뢰성 있는 인지를 위해 적응적 임계값을 사용하는 방식을 적용하였으며 USRP가 제공하는 다양한 신호세기에 대해서 실험하였다.

## 2. 실험

먼저 우리는 서브캐리어 수준 신호 송수신의 실현가능성을 보였다. <그림 6>은 결과를 보여준다. 우리의 실험환경에서는 최대 3개의 노드가 동시에 CRQ신호를 전송하므로, 최대 3개의 CRQ신호의 합성신호가 AP에 도달한다. 이 합성CRQ신호의 SNR을 X축으로 하여,

서브캐리어 수준의 시그널링의 정확도 그래프를 그렸다. 우리는 합성되기 전의 각 CRQ신호들 간 신호세기가 5dB이상 차이는 경우 “different case”라고 부르고, 그렇지 않은 경우 “similar case”라고 부른다. 우리의 모든 실험결과에서, D-Fi 서브캐리어 수준 시그널링은 잘 동작함을 확인하였다. 작은 확률이지만 가끔 bitwise-FP<sup>5</sup> 그리고 bitwise-FN가 발생하나 [7]에 소개된 방법을 적용하면 신뢰도 높은 CRQ디코딩성능을 보장할 수 있다.

다음 우리는 채널상태측정의 정확도를 보인다. 그림5에서 보인 바와 같이, 대부분의 경우에 (90%이상) 채널상태 측정방법은 1dB이하의 채널상태측정에러를 보였다.

이 두 실험결과를 통해 제안하는 주파수 도메인 채널경쟁 프로토콜이 통상의 무선랜 환경에서 실용적으로 쓸 수 있음을 보였다.

## 3. 시뮬레이션

USRP기반 D-Fi프로토타입은 블룸필터 기반 채널경쟁과 채널상태측정의 실제 실현가능성을 보여주기에 적절하나, D-Fi가 다이버시티를 잘 활용하는지를 보여주기에 적절하지 않다. USRP는 소프트웨어 방식으로 무선신호를 구현하고 있어 하드웨어기반 라디오와 비교하여 지원 가능한 데이터 전송률도 높지 않다. 그러므로 우리는 실제 무선환경에서의 D-Fi의 성능을 측정하기 위해서 트레이스 기반 시뮬레이션을 이용하였다.

무선환경을 에뮬레이션 하기 위해서 우리는 [11]의 저자들로부터 제공받은 802.11n 데이터셋을 이용하였다. 이는 상용 인텔 Wi-Fi Link 5300 NIC를 이용하여 수집된 데이터로 이동 링크와 비 이동 링크 모두에 대해 서브캐리어 별 RSSI(Received Signal Strength Indicator)값들로 구성된다.

우리는 D-Fi의 다이버시티 탐색/이용 성능을 평가한다. 기존의 방법과의 성능비교를 위해서, 802.11n [1], FICA [4], Carrier-by-carrier in turn 알고리즘(C-by-C) [12], FARA [13], 처리량 측면에서의 최적해 등을 시뮬레이터에 구현하였다. 또한, 공정한 성능비교를 위해 우리는 FARA와 C-by-C알

5 서브캐리어에 실제 신호가 없음에도 있다고 판단하는 경우를 의미하며 FP(False positive), 그 반대의 경우를 FN(False negative)로 지칭한다.

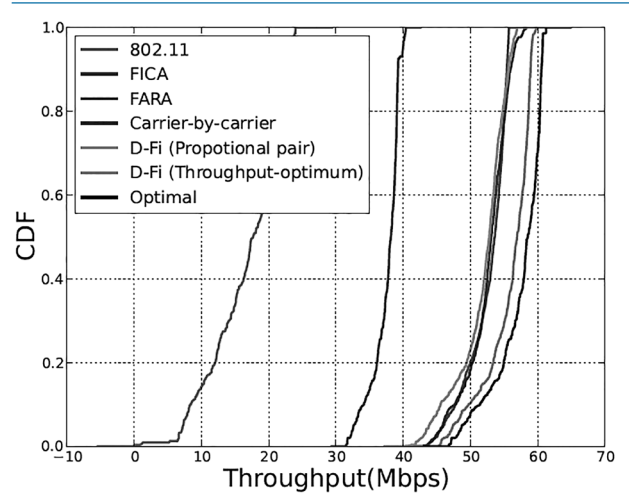


그림 7. 성능평가 결과

고리즘이 서브채널을 채널접근의 기본단위로 사용하도록 수정하였다. D-Fi의 최적 성능을 측정하기 위해 각종 파라미터 값들 [7]은 실험적으로 조정되었다.

## 4. 시뮬레이션 결과

<그림 7>은 각 방법들의 처리량(Throughput)의 경험적 누적 분포함수 (ECDF)를 도식한 것이다. 처리량에서의 이득은, 기존 802.11n과 FICA에 비교해서 각각 3배, 1.5배정도이다. 성능이 향상되는 이유는 2장에서 설명한 바와 3가지 요소에 의하여 결정된다.

다이버시티를 활용할 수 있어 생긴 FICA에 비해 1.5배의 성능을 보여주고 있으며 프로토콜의 효율성 측면에서는 FICA방법과 유사하다고 볼 수 있다. 이는 무선랜 표준에 비해 2배의 성능향상을 가져온 것이다.

게다가 우리는 D-Fi의 다이버시티 탐색/이용 성능을 기존의 다른 다이버시티를 이용할 수 있는 방법들과 처리량측면에서 비교하였다. D-Fi는 전체 서브채널이 아닌 서브채널 일부의 채널상태를 측정함에도 불구하고 기존의 모든 채널상태를 알고 채널할당을 하는 방법들과 비교하여 동등한 성능을 보인다.

## V. 결론

우리는 본고에서 최근 학계에서의 OFDM의 특징을 활용한 주파수 도메인 채널접근기술의 연구동향[4][5][6]을 살펴보았다.

이를 기반으로 제안하는 프로토콜인 D-Fi[7]를 살펴보고 기존 기술과의 비교우위에 있는 사항들을 짚어보았다. D-Fi는

기존의 연구들에서 OFDM 서브캐리어를 단순한 시간 도메인 timeslot 대신 사용한 것과 달리 블룸필터라는 OFDM기반 물리계층 기술에 의미(Semantic)을 부여하는 방법으로 다소간 복잡한 연산을 수행할 수 있는 프로토콜이다.

제안하는 프로토콜은 블룸필터를 이용하여, 채널경쟁과 채널 상태측정을 적은 오버헤드로 수행하여 다이버시티를 효율적으로 활용할 수 있다. 우리는 제안하는 방법이 실현성이 높으며 성능측면에서 우수함을 실험 및 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. [14]에서는 이를 QoS(Quality-of-service)를 활용할 수 있도록 VBF(Variable Length Bloom Filter)를 사용하는 프로토콜이 소개되어 있다. 차후D-Fi PHY/MAC프로토콜이 다운로드 혹은 애드혹 모드로 동작할 수 있도록 하는 연구를 향후에 진행할 계획이다.

## 참고 문헌

- [1] IEEE Standard for local and metropolitan area networks Part 11: amendment 5: Enhancements for higher throughput. IEEE Std 802.11n-2009.
- [2] "IEEE Std. 802.16-2004, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks, Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems."
- [3] S. Lee and C.-K. Kim, "D-Fi: A diversity-aware Wi-Fi using an OFDM-based Bloom filter," in Network Protocols (ICNP), 2012 20th IEEE International Conference on, pp. 1-10, IEEE, 2012.
- [4] K. Tan, J. Fang, Y. Zhang, S. Chen, L. Shi, J. Zhang, and Y. Zhang, "Finegrained Channel Access in Wireless LAN," ACM SIGCOMM Conference, 2011.
- [5] S. Sen, R. Roy Choudhury, and S. Nelakuditi, "No time to Countdown: Migrating Backoff to the Frequency Domain," in Proceedings of the 17th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'11), pp. 241-252, ACM, 2011.
- [6] X. Feng, J. Zhang, Q. Zhang, and B. Li, "Use Your Frequency Wisely: Explore Frequency Domain for Channel Contention and ACK," in Proceedings of the 31st Annual IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM'12), pp. 549-557, IEEE, 2012.
- [7] S. Lee, J. Choi, J. Yoo, and C.-K. Kim, "Frequency Diversity-Aware Wi-Fi Using OFDM-based Bloom Filters," Mobile Computing, IEEE Transactions on (preprint), 2014.
- [8] A. Broder and M. Mitzenmacher, "Network Applications of Bloom Filters: A Survey," Internet Mathematics, vol. 1, no. 4, pp. 485-509, 2004.
- [9] D. Kalathil, N. Nayyar, and R. Jain, "Decentralized Learning for Multi-Player Multi-Armed Bandits," in Decision and Control (CDC), 2012 IEEE 51st Annual Conference on, pp. 3960-3965, IEEE, 2012.
- [10] Ettus research, <http://www.ettus.com>.
- [11] A. Bhartia, Y.-C. Chen, S. Rallapalli, and L. Qiu, "Harnessing Frequency Diversity in Multicarrier Wireless Networks," in Proceedings of the 17th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'11), pp. 253-264, ACM, 2011.
- [12] J. Huang, F. Qian, Y. Guo, Y. Zhou, Q. Xu, Z. M. Mao, S. Sen, and O. Spatscheck, "An In-depth Study of LTE: Effect of Network Protocol and Application Behavior on Performance," in Proceedings of the ACM SIGCOMM 2013 conference on SIGCOMM, pp. 363-374, ACM, 2013.
- [13] H. Rahul, F. Edalat, D. Katabi, and C. G. Soderstrom, "Frequency-Aware Rate Adaptation and MAC Protocols," in Proceedings of the 15th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'09), pp. 193-204, ACM, 2009.
- [14] S. Lee, "Efficient Diversity-Aware Frequency-Domain Channel Access for Wi-Fi Networks," Ph.D. Thesis, Seoul National University, Aug. 2014.



## 약 력



이 수 철

2008년 서울대학교 공학사  
2014년 서울대학교 공학박사  
2014년~현재 한국전자통신연구원 부설연구소  
연구원  
관심분야: 차세대 무선네트워크, 유무선 보안,  
트래픽 엔지니어링



박 세 웅

1984년 서울대학교 공학사  
1986년 서울대학교 석사  
1991년 University of Pennsylvania 박사  
1991년~1994년 AT&T Bell Lab.  
1994년~현재 서울대학교 교수  
관심분야: 차세대 무선네트워크, P2P시스템,  
스마트 그리드



김 종 권

1981년 서울대학교 공학사  
1982년 Georgia Institute of Technology  
공학석사  
1987년 University of Illinois at Urbana-  
Champaign 공학박사  
1987년~1991년 Bellcore, Technical Staff.  
1991년~현재 서울대학교 컴퓨터공학부 교수.  
관심분야: 무선통신, 이동통신, 고속 네트워크,  
분산처리, 성능평가, 네트워크 보안