IEEE 802.11g ERP-OFDM 파라미터 기준 DCF 처리율 분석

(Throughput Analysis of the IEEE 802.11g DCF
with ERP-OFDM Parameters)

강 구 홍*
(Koo Hong Kang)

요 약 지난 수년간 IEEE 802.11 DCF 처리율 분석에 대한 연구가 진행되어 왔다. 그러나 이들 연구 결과들은 IEEE 802.11g 물리계층 ERP-OFDM 파라미터를 정확히 반영하고 있지 않아 오늘날 대부분이 사용하고 있는 무선랜 802.11g의 처리율 분석을 기존 결과를 이용해 예측할 수밖에 없다. 특히, 이러한 단순 예측은 실제 운영 중인 무선랜 환경에서는 다른 결과를 가져올 수도 있다. 따라서 본 논문에서는 운영 중인 무선랜 환경에서 IEEE 802.11g ERP-OFDM 물리계층 파라미터를 직접 측정하고 이를 기준으로 포화상태 트래픽 조건하에서 802.11 DCF 처리율을 분석하였다. 또한 FTP 서비스를 이용한 실제 트래픽을 발생시켜 운영 중인 무선랜에서 측정한 DCF 처리율과 이들 분석적 모델 분석결과와의 차이를 확인함으로써 포화상태를 가정한 DCF 처리율 분석 모델의 적용 가능성을 확인하였다.

핵심주제어 : 무선랜, DCF 처리율, 802.11g OFDM

Abstract A lot of works on the throughput analysis of the IEEE 802.11 DCF have been studied since last few years. However, we should predict the throughput of the IEEE 802.11g that we mostly use today because the existing numerical results do not consider exactly the IEEE 802.11g with the physical layer ERP-OFDM parameters. In particular, we might have different results in the working WLANs compared with the simple predictions of the throughput using the previous results. In this paper, we directly monitor the ERP-OFDM physical layer parameters on the operating WLANs, and then analyze the saturated DCF throughput with the well-known analytic model. Moreover, we measure the bandwidth utilization on the real WLANs working with FTP services, and then compare them with the analytic results. According to the experiment results, we confirm the usefulness of the analytic models which assume the saturated traffic sources.

Key Words : Wireless LAN, DCF Throughput, 802.11g OFDM

1. 서 론

1.1 연구 배경

무선랜 카드를 탑재한 노트북 PC를 사용하는 기준

무선랜 이용자와 함께 최근 스마트폰과 스마트패드(태블릿 PC)의 등장으로 무선랜 사용자 수는 하루가 다르게 증가하고 있다. 뿐만 아니라, 저렴한 가격에 무선랜용 AP(Access Point) 구입이 가능해짐에 따라 이용의 편리성과 보안등의 이유로 아파트 혹은 사무실 빌딩 안에 설치되는 AP 개수는 놀라운 속도로 증가하

* 서원대학교 정보통신공학과

고 있다. 최근 표준화 작업이 진행 중인 100Mbps 이상의 속도를 지원하는 IEEE 802.11n[1] 등장으로 무선랜 서비스 속도는 기존 유선 망 속도를 거의 따라 잡을 것으로 예상되고 있어 무선랜 사용자 수의 증가 추세는 당분간 계속 이어질 것으로 전망된다. 그러나 802.11n의 표준화 작업에도 불구하고, 실제 지난 몇 년간 무선랜 시장에서의 주류는 IEEE 802.11g[2] 제품이다. 그 이유는 54 Mbps 속도를 지원하는 802.11g 제품들이 일부 멀티미디어 서비스를 제외하고는 서비스 속도 면에서 큰 불평이 없다는 사실이다. 또한 지난 몇 년간 설치된 무선랜 카드와 AP의 물량을 생각하면 앞으로 몇 년 간은 802.11g가 무선랜 시장의 중심에 있을 것으로 쉽게 예상된다.

초기 IEEE 802.11 표준안은 세 개의 물리계층, 즉 DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum), FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum), 그리고 IR (Infrared) 기술을 사용하여 1 Mbps와 2 Mbps의 데이터 전송률을 지원하였다[3]. DSSS와 FHSS 동작은 2.4 GHz의 ISM (Industrial, Scientific, and Medical) 에서 이루어진다. 이러한 초기 무선랜은 빠른 성장을 보이면서 IEEE b/a/g 표준안들이 연이어 등장하였다. IEEE 802.11a는 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 물리계층을 사용하여 5 GHz 비인가 U-NII (Unlicensed National Information Infrastructure) 대역에서 6 Mbps 부터 최고 54 Mbps 까지 데이터 전송률을 지원한다. IEEE 802.11g는 2.4 GHz 대역에서 IEEE 802.11a의 속도를 지원함에 따라서 기존 IEEE 802.11과 IEEE 802.11b 제품들과의 상호 운용 (interoperability)도 제공할 수 있게 되었다. IEEE 802.11g 물리계층은 DSSS, OFDM, 혹은 이들을 동시에 사용한다. 따라서, IEEE 802.11g는 이들 DSSS와 OFDM의 조합에 따라 네 가지 물리계층 - ERP-DSSS/CCK, ERP-OFDM, ERP-DSSS/PBCC, 그리고 DSSS-OFDM - 을 정의하고 있다[4]. ERP (Extended Rate Physical) 표준안에 정의된 이들 계층들은 프레임 전송에 직접 관련됨으로 송.수신 노드(이하 STA로 약칭)는 이들 네 가지 물리계층 중 하나를 선택해야 한다. 이들 물리계층 중에서 54 Mbps 데이터 전송률을 지원하는 것으로는, IEEE 802.11a 데이터 전송률을 2.4 GHz 대역에서 지원하기 위해 OFDM을

사용하는 ERP-OFDM 과 non-ERP STA들과의 상호 운용을 지원하기 위해 IEEE 802.11 데이터 프레임(이하 프레임으로 약칭)의 페이로드(payload)만 OFDM으로 전송하는 DSSS-OFDM 물리계층이 있다. 본 논문에서는 ERP-OFDM 물리계층만 고려한다.

IEEE 802.11은 유선망과 연결이 없는 독립적인 BSS (Basic Service Set)를 지원하는 애드-혹(ad-hoc) 망과 유선망과 연결된 AP를 포함하는 infrastructure 망(이하 BSS로 약칭)을 지원한다. 본 논문에서는 우리가 일반적으로 사용하고 있는 BSS만 고려한다. 즉 하나의 AP와 여기에 연결된 다수의 클라이언트들은 하나의 BSS를 형성하고 동일한 채널을 사용하여 모든 통신이 AP를 경유하여 이루어진다[5].

802.11 MAC 프로토콜은 CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 프로토콜을 기본으로 사용하는 DCF (Distributed Coordination Function)를 이용해 무선 매체에 접근하여 프레임을 전송한다. 여러 STA에서 동시에 발생한 프레임에 의해 프레임 충돌이 발생하거나 혹은 무선 채널 상에서 프레임 전송오류에 의해 프레임 전송이 실패하면 STA는 2진 지수 백-오프 (binary exponential back-off) 규칙을 사용해 재전송을 시도한다. 표준안은 DCF 이외에 옵션으로 PCF (Point Coordination Function)를 정의하고 있다. PCF는 중앙 집중형 MAC 프로토콜로서 AP에 의해 충돌이 전혀 없는 시간 제약 (time limited) 서비스를 지원한다. DCF는 프레임 전송을 위해 두 가지 방법 - Basic Access 모드와 RTS/CTS (Request-To-Send/Clear-To-Send) 모드 - 을 사용한다. Basic Access 모드는 송신 STA에서 전송된 프레임이 충돌이나 전송오류 없이 수신 STA에 성공적으로 도착하면, 수신 STA는 ACK (Acknowledgment) 프레임을 송신 STA에 전송하여 프레임 전송이 성공적으로 완료되었음을 알려준다. RTS/CTS 모드는 데이터 프레임 전송에 앞서, RTS라고 불리는 짧은 프레임을 수신 STA로 전송하고 RTS를 수신한 수신 STA는 CTS 프레임을 송신 STA에 전송함으로써 실제적인 데이터 프레임 전송 시 무선 채널 상에서 프레임 충돌을 완벽하게 방지하게 된다. 그러나 RTS/CTS 교환은 심각한 오버헤드를 가져오

기 때문에 BSS에서는 거의 사용되지 않고 있다. 따라서 본 논문에서는 DCF Basic Access 모드만 고려한다.

1.2 연구 동기

무선랜 사용 시 AP 혹은 무선랜 카드의 설정에 어려움을 겪게 된다. 즉 플러그-앤-플레이(PnP: Plug-and-Play) 패러다임 보다는 사용자가 적절하게 무선랜 환경을 설정해야 하는 경우가 많다. 그러나 일반 사용자의 경우 생산자가 제품 출하 시 설정한 환경 그대로 사용하는 경우가 대부분이다. 물론 보안과 관련된 설정 이외에는 일반 사용자가 특별히 신경을 쓰지 않아도 사용에는 커다란 지장은 없는 것 또한 사실이다. <그림 1>은 초기 설정을 그대로 유지한 하나의 AP로부터 발생되는 beacon 프레임을 캡처한 화면이다. BSS 망 내 AP는 주기적으로 beacon 프레임을 전송하고, STA 들은 수신된 beacon 프레임을 통해 AP 신호의 강도를 모니터하고 전력절약(saving power) 기능을 위한 버퍼된 데이터 프레임에 대한 정보를 획득하게 된다. 이들 정보 이외에도 <그림 1>에서 보듯이 beacon 프레임 내 IEEE 802.11 무선랜 관리 정보 (Capability Information)를 통해 프리앰블 길이, 슬롯 시간, 그리고 DSSS-OFDM 사용 여부 등을

확인할 수 있다.

Bianchi[6]는 무선 채널 상에 전송 오류가 없다는 가정 하에 포화(saturated) 트래픽에 대한 DCF 성능 분석을 위한 분석적(analytic) 모델을 제시하고 FHSS 물리계층 파라미터와 1 Mbps 채널 전송률을 기준으로 포화상태 처리율(throughput)을 보여주었다. 그러나 우리가 사용하고 있는 IEEE 802.11g 물리계층 ERP-OFDM에서 DCF의 처리율은 BSS내 STA 수가 증가함에 따라 어떤 변화를 보일 것인지는 Bianchi가 보여준 결과와는 사뭇 다를 것이다. 특히, 무선랜 카드와 AP가 사용하는 다양한 시스템 파라미터를 실제 운용 중인 무선랜 환경에서 정확히 파악하고 이를 기준으로 DCF 처리율을 확인하는 것은 효율적인 무선랜 운용에 있어 무엇보다 중요한 작업이 될 것이다. 한편, 이러한 분석적 모델과 병행하여 NS2 혹은 C++ 기반의 시뮬레이션을 통한 DCF 성능 분석이 이루어져 왔다. 그러나 이와 같은 분석적 모델 및 시뮬레이션에 의한 DCF 분석은 여러 가지 가정을 전제로 하고 있어 실제 무선랜 망에서의 실험적 결과가 병행되는 것이 반드시 필요하다. 따라서 본 논문에서는 실제 무선랜 시험 망을 구성하고 시험 망으로부터 직접 측정된 자료를 기준으로 분석적 모델에 의한 연구 결과들의 적용 가능성 알아보았다.

서론에 이어, 제2장에서는 관련 연구로서 본 논문

```

IEEE 802.11 wireless LAN management frame
  Fixed parameters (12 bytes)
    Timestamp: 0x00000016B3AB817F
    Beacon Interval: 0.102400 [Seconds]
  Capability Information: 0x0401
    ...1 = ESS capabilities: Transmitter is an AP
    ...0. = IBSS status: Transmitter belongs to a BSS
    ...0. .... 00.. = CFP participation capabilities: No point coordinator at AP (0x0000)
    ...0. .... 00.. = Privacy: AP/STA cannot support WEP
    ...0. .... 00.. = Short Preamble: Short preamble not allowed
    ...0. .... 00.. = PBCC: PBCC modulation not allowed
    ...0. .... 00.. = Channel Agility: Channel agility not in use
    ...0. .... 00.. = Spectrum Management: dot11SpectrumManagementRequired FALSE
    ...1. .... 00.. = Short Slot Time: Short slot time in use
    ...0. .... 00.. = Automatic Power Save Delivery: apsd not implemented
    ...0. .... 00.. = DSSS-OFDM: DSSS-OFDM modulation not allowed
    ...0. .... 00.. = Delayed Block Ack: delayed block ack not implemented
    ...0. .... 00.. = Immediate Block Ack: immediate block ack not implemented
  Tagged parameters (48 bytes)
    SSID parameter set
    Supported Rates: 1.0(B) 2.0(B) 5.5(B) 11.0(B) 6.0 9.0 12.0 18.0
    DS Parameter set: Current Channel: 6
    Traffic Indication Map (TIM): DTIM 0 of 1 bitmap empty
    ERP Information: no Non-ERP STAs, do not use protection, long preambles
      Tag Number: 42 (ERP Information)
      Tag length: 1
      Tag interpretation: ERP info: 0x4 (no Non-ERP STAs, do not use protection, long preambles)
    Extended Supported Rates: 24.0 36.0 48.0 54.0
  
```

<그림 1> Beacon 프레임

서 사용할 IEEE 802.11g의 MAC 프로토콜 및 물리계층에 대해 기술하고 IEEE 802.11 DCF 성능 분석에 대한 기존 분석적 모델 연구들을 간략히 기술한다. 한편 이들 기존 분석적 모델들을 이용해 제3장에서는 IEEE 802.11g 물리계층 ERP-OFDM 물리계층 파라미터를 기준으로 DCF 처리율을 알아본다. 제4장에서는 실제 무선랜에서 측정한 실제 데이터를 제시하고, 마지막으로 제5장에서 결론을 맺는다.

2. 관련 연구

2.1 IEEE 802.11 DCF

본 절에서는 802.11 MAC 프로토콜로 표준화된 DCF에 대해 간략히 설명한다. STA는 프레임을 전송하기에 앞서 채널이 사용 중인지 감지한다. 만약 DIFS (Distributed Interframe Space) 시간 동안 채널이 휴지 상태로 감지가 되면 전송을 시도한다. 그렇지 않고 만약 채널이 사용 중으로 감지되면 DIFS 시간 동안 채널이 휴지 상태가 될 때까지 기다린다. 이때 STA는 랜덤 백오프 시간을 결정한다. 백오프 타이머는 채널이 휴지 상태인 경우 감소하게 되며 채널이 사용 중 상태가 되면 멈추고, 다시 DIFS 이상 휴지 상태가 되면 감소를 진행하게 된다. 결국 백오프 타이머가 종료되면 STA는 프레임 전송을 시도한다. 전송된 프레임이 수신 STA에 성공적으로 수신 완료되면 수신 STA는 SIFS (Short Interframe Space) 구간 후 ACK 프레임을 전송함으로써, 송신 STA에서 정상적으로 프레임이 전송 완료되었음을 알 수 있다. 한편, 전송 도중에 다른 STA에서 시도한 프레임과 충돌이 발생하거나 혹은 잡음과 같은 전송장애로 인한 프레임 전송 에러가 발생할 경우, DCF는 지수적 백오프 기법을 사용한다. 즉 프레임 전송이 실패할 때 마다 충돌 윈도우는 두 배씩 증가하게 되며, 백오프 타이머는 이들 충돌 윈도우 사이 랜덤 값을 갖게 된다.

BSS 망 내 AP는 주기적으로 beacon 프레임을 전송하고, STA 들은 수신된 beacon 프레임을 통해 AP 신호의 강도를 모니터링한다. AP가 beacon 프레임을 전송하기 원할 때 채널이 휴지상태이면 즉시 전송을 시

도하고, 그렇지 않고 사용 중 상태이면 AP는 PIFS (PCF Interframe Space) 동안 채널이 휴지상태가 될 때까지 기다린다. Beacon 프레임 내에는 필요에 따라 사용되는 선택적 필드들이 존재하기 때문에 beacon 프레임의 길이가 고정되어 있지 않다. 본 논문에서는 MAC 헤더를 포함해 106 바이트 길이의 일반적인 beacon 프레임을 가정한다. 또한, BSS 내 저속 데이터 전송률로 동작하는 STA가 존재할 가능성 있어, 이들 STA와 상호 운용을 위해 beacon 프레임은 일반적으로 1Mbps로 전송 된다 (제5장에서 실제 운용 중인 무선랜 망에서도 확인되었다).

2.2 802.11g 물리계층

IEEE 802.11g는 54 Mbps까지 높은 데이터 전송률을 보장하기 위해 2.4 GHz ISM 밴드에서 DSSS, OFDM, 혹은 이들 둘을 동시에 사용한다. 이들 조합에 따른 물리계층 중 54 Mbps 전송률을 제공하는 위해 기본적으로 ERP-OFDM을 표준화하고 non-ERP STA와의 상호 운용을 지원하기 위해 옵션으로 DSSS-OFDM을 표준화하였다. 제5장에서 실제 운용 중인 무선랜에서 확인한 결과 대부분 DSSS-OFDM이 사용되지 않는 것으로 확인되었고, 따라서 본 논문에서는 ERP-OFDM 물리계층만 고려한다. 실제로 DSSS 프리앰블을 사용하는 경우 네트워크 오버헤드의 증가로 DSSS-OFDM 물리계층이 상당히 비효율적이 된다[4].

ERP-OFDM 물리계층은 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 그리고 54 Mbps 데이터 전송률을 지원하고, 이들 모든 전송률에 대해 긴 슬롯 시간 (20 usec)과 짧은 슬롯 시간 (9 usec) 모두 지원한다. 다음 <표1>은 본 논문에서 적용된 IEEE 802.11g ERP-OFDM 시스템의 파라미터 및 성능측정을 위해 사용된 시스템 파라미터를 보여준다.

2.3 기존의 분석적 DCF 성능 분석

Bianchi[6]는 무선 채널 상에 전송 오류가 없다는 가정 하에 포화(saturated) 트래픽에 대한 DCF 성능 분석을 위한 분석적(analytic) 모델을 제시하고 FHSS

물리계층 파라미터와 1 Mbps 채널 전송률을 기준으로 포화상태 처리율(throughput)을 보여주었다. Bianchi의 분석적 모델을 기반으로 Tang et al.[7]은 무선채널 상의 비트 오류를 고려한 분석적 모델을 제시하였으며, Lopez-Aguilera et al.[8]는 AP가 발생시키는 beacon 프레임의 영향을 고려한 DCF 성능의 분석적 모델을 제시하였다. 특히, Lopez-Aguilera et al.[8]는 beacon 프레임 주기와 패킷 패이로드 크기에 따른 성능분석 결과를 제시하였다.

Bianchi 모델은 하나의 STA에서 DCF 알고리즘을 백오프 시간 계수기(backoff time counter)에 대한 추계적 프로세스 (stochastic process)로 모델링하여 임의의 슬롯 시간에서 하나의 STA가 프레임을 전송할 확률 τ 를 구했다[6]. 본 논문에서는 Bianchi의 분석적 모델을 기반으로 한 이들 수학적 연구결과들을 이용해 무선채널 전송 오류와 beacon 프레임이 모두 고려된 IEEE 802.11g 물리계층 ERP-OFDM 파라미터를 기준으로 DCF 처리율에 대한 분석 결과를 제 3장에 제시하였다. 그러나 이들 기존 연구결과의 내용과 중

복을 피하기 위해 최대한 기술을 자제하였기 때문에 DCF 처리율을 구하기 위한 분석적 모델에 대한 자세한 수식은 관련 참고문헌을 참고 바란다.

2.4 기존의 802.11g DCF 성능 측정 연구

지난 수년간 계속된 IEEE 802.11 DCF 성능분석의 물리계층 대상은 Bianchi[6]가 처음 사용한 1 Mbps의 FHSS를 기준으로 대부분 이루어져 왔다. 물론 최근에는 IEEE 802.11b/a가 제공하는 속도를 반영하기 위한 물리계층 파라미터를 가정하고 있지만, 여전히 1 Mbps FHSS 물리계층 파라미터를 기준으로 성능분석 결과를 보여주고 있다. 그 이유는 성능분석 결과를 검증하기 위해 기존 연구결과들을 참고할 수 있고, 시뮬레이션을 위한 이벤트 발생 수가 54 Mbps 속도의 물리계층에 비해 상대적으로 작아 시뮬레이션 수행속도가 빨라지기 때문이다. 또한, 1 Mbps FHSS 물리계층 파라미터는 PLCP 프리앰블과 헤더의 전송속도와 MPDU의 전송속도가 동일해 분석적 모델과 시뮬레이션 시 여러모로 간결성을 가져다준다. 따라서 802.11g ERP-OFDM 물리계층 파라미터를 기준으로 DCF 성능을 다양한 각도에서 보여주는 연구결과는 쉽게 찾아 볼 수 없다. Lopez-Aguilera et al.[8]는 Beacon 프레임 전송 주기의 변화에 따른 DCF 성능분석 결과를 802.11g 물리계층 파라미터를 기준으로 보여주고 있으나, 본 논문에서 사용하는 실제 운영 중인 무선랜에서 측정한 802.11g 물리계층 파라미터와 다소 차이가 있으며 제3장에서 보여줄 프레임 전송 오류를 포함한 802.11g ERP-OFDM의 다양한 시스템 처리율 분석은 본 논문이 처음이다. 뿐만 아니라, 본 논문은 실제 무선랜에서 802.11g ERP-OFDM의 실측된 데이터 전송률 및 재전송 변화를 보여준다.

3. 802.11g ERP-OFDM 포화상태의 처리율

<그림 2>는 <표 1>에 나타난 무선랜 시스템 환경에서 프레임전송 시 발생하는 비트 전송 오류 및 beacon 프레임 전송에 따른 성능 저하를 고려하지 않고 BSS 내 STA 수 n 에 따른 순수 DCF 포화상태

<표 1> IEEE 802.11g ERP-OFDM 시스템의 파라미터 및 성능측정을 위해 사용된 시스템 파라미터

파라미터	802.11g (ERP-OFDM)
패킷 패이로드	8184 비트
MAC 헤더	272 비트
PHY 프리앰블	16 usec
PHY 헤더	4 usec (128비트)
ACK	112 비트
채널 속도	54 Mbps
전파 지연	1 usec
슬롯 시간	9 usec (short) 20 usec (long)
SIFS	10 usec
PIFS	30 usec
DIFS	50 usec
최소 백오프 윈도우 크기	32
최대 백오프 윈도우 크기	1024
Beacon 길이	106 바이트
Beacon 주기	100 msec
Beacon 전송율	1 Mbps

처리율을 보여준다. 그림에서 보듯이, 짧은 슬롯 사용 시 긴 슬롯 시간과 비교해 처리율이 증가함을 볼 수 있고 n 이 작은 경우 이들 처리율의 차이는 더욱 크다. 짧은 슬롯 시간 사용 시, $n=2$ 일 때 26.5%, $n=10$ 일 때 8.7% 처리율 증가를 보이며 실제 운용 중인 무선랜을 조사하면 대부분 짧은 슬롯 시간을 실제 사용하고 있는 것으로 조사되었다(제4장 참조). 따라서 본 논문에서도 특별한 언급이 없는 한 짧은 슬롯 시간에 대해서만 분석하였음을 밝힌다.

<그림 2> 프레임 전송 에러 및 beacon 프레임 전송에 따른 성능저하를 배제한 순수 802.11g DCF 포화상태 처리율 (실선: 긴슬롯시간, 점선: 짧은 슬롯 시간)

<그림 2>에서 보듯이 $n < 10$ 에서는 n 이 증가하면 처리율이 증가하며, 이러한 변화의 추이는 n 이 증가하면 처리율이 단순 감소하는 Bianchi[6]의 결과(FHSS 시스템 파라미터 적용과 채널 비트율이 1 Mbps)와는 상당한 차이를 보인다. 이러한 원인은 n 이 증가하면 무선 채널 상에서 프레임 충돌확률이 증가하여 처리율이 감소하게 되지만, n 이 10 이하에서 54 Mbps 전송 속도를 갖는 ERP-OFDM 환경에서는 n 이 증가하면 τ 값이 처리율이 최대가 되는 최적의 τ^* 값[6]에 가까워져 시스템 점유율이 증가하게 된다. 즉 τ 는 STA 수 n 과 최대 백오프 스테이지 수와 초기 백오프 시간에 의해 결정되는데, n 이 10 이하에서는 n 이 커지면 백오프 시간에 의한 채널 휴지 상태 시간 감소에 따른 성능 향상 효과가 더 크기 때문에 전체 시스템 점유율이 증가하게 된다. <그림 3>은 STA 수

에 따른 τ 와 최적의 τ^* 의 차이를 보여준다. 그림에서 $n=10$ 을 경계로 두 값의 차이가 반전 되는 것을 볼 수 있다.

<그림 3> STA 수 n 에 따른 τ 와 최적의 τ 비교 (실선: 최적의 τ^* , 점선: τ)

<그림 4> Beacon 프레임 전송을 고려한 802.11g DCF 포화상태 처리율 (x 점선: beacon 프레임 무시, + 실선: beacon 프레임 고려)

한편, <그림 2>에서 보듯이 $n > 10$ 에서는 충돌확률이 증가함에 따라 포화상태의 처리율은 점진적으로 서서히 감소하게 된다. 그러나 처리율이 급격하게 감소하는 Bianchi[4]의 결과와 다소 다름을 확인할 수 있다. 결국 전송률 54 Mbps로 동작하는 ERP-OFDM 환경에서는 n 이 크게 증가하더라도 시스템 처리율은

포화상태 수준을 상당히 완만하게 유지할 것으로 예상된다.

<그림 4>는 하나의 AP로부터 beacon 전송 주기가 100msec 인 경우, DCF 포화상태의 처리율을 보여준다. 그림에서 보듯이 beacon 프레임 전송에 따른 시스템 처리율은 약 1% 정도 감소하는 것으로 나타난다. 그러나 제4장에서 언급하겠지만, AP로부터 beacon 전송 주기를 빠르게 설정하거나 혹은 동일한 채널을 사용하는 여러 개의 AP가 서로의 신호가 감지되는 가까운 거리 내에 존재하게 되면, beacon 프레임 전송에 따른 시스템 처리율 감소는 점점 더 심각하게 될 것이다. <그림 5>는 프레임 길이 8184 비트에 대한 비트 전송 오류 확률 BER P_b 에 따른 시스템 처리율 변화를 보여준다 (하나의 AP로부터 beacon 전송 주기가 100msec). 그림 내 선들은 STA 개수 n 이 각각 1, 10, 30, 그리고 50을 나타낸다. 그림에서 보듯이 $P_b = 10^{-5}$ 에서 처리율이 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 이미 앞에서 언급한 바와 같이 $n = 30, 50$ 에서 처리율 차이가 크지 않으며, $n = 1$ 인 경우 가장 낮은 처리율을 보여 준다. 이러한 처리율 변화 추이는 Bianchi가 사용한 시스템 파라미터를 그대로 적용한 Tang[7]의 결과와는 많은 차이를 보여준다.

<그림 5> 프레임 길이 8184 비트에 대한 채널 비트 오류에 따른 802.11g DCF 포화상태 처리율 (N1: $n = 1$, N10: $n = 10$, N30: $n = 30$, N50: $n = 50$)

<표 2>는 <그림 5>에서 $P_b = 0$ 과 $P_b = 10^{-6}$ 에

서 각각의 DCF 처리율을 다시 정리한 표이다. 표에서 보듯이 두 값의 차이가 0.01을 넘어서지 않는다. 따라서 무선 채널 상의 비트 전송 오류가 $P_b = 10^{-6}$ 을 넘어서지 않으면 처리율의 변화는 거의 동일하다고 보면 된다.

<표 2> $P_b = 0$ 과 $P_b = 10^{-6}$ 에서 처리율 차이

n	$P_b = 0$	$P_b = 10^{-6}$
1	0.375304	0.372277
2	0.439228	0.434901
10	0.457941	0.454688
30	0.415133	0.412690
50	0.389247	0.387076

<그림 6>은 하나의 AP로부터 beacon 전송 주기가 20msec를 가정하고 STA 개수 n 의 변화에 따른 DCF 포화상태 처리율을 보여준다. 그림 내 선들은 무선 채널 상의 BER(Bit Error Rate)이 각각 10^{-6} , 10^{-5} , 그리고 5×10^{-4} 을 나타낸다.

<그림 6> 채널 비트 에러에 따른 802.11g DCF 포화상태 처리율(BER-6: $P_b = 10^{-6}$, BER-5: $P_b = 10^{-5}$, BER-5x4: $P_b = 5 \times 10^{-4}$)

Beacon 전송 주기를 100msec에서 20msec로 줄인 이유는 다음 제5장에서 실험한 시험환경을 비슷하게 맞추기 위함이다. 즉 제5장에서 구현한 무선랜 시험망 주위에 이미 운용중인 동일 채널을 사용하는 AP가 5

개 존재하고 (<그림 8> 참조), 이들 AP에서 100msec 주기로 발생시키는 beacon 프레임들이 상호 독립적이라고 가정하였다. 한편, <그림 4>와 비교해 보면, $n = 10$ 에서 beacon 프레임 전송에 의해 처리율이 약 4.5% (처리율 0.462096에서 0.441319로 감소) 감소하는 것으로 나타났다.

4. 실험

4.1 실험 환경 및 방법

무선랜 서비스를 지원하는 IEEE 802.11g infrastructure 무선랜 시험망 환경을 <그림 7>과 같이 구성하였다. 그림에서 보듯이, 두 개의 STA와 하나의 AP가 802.11g 채널로 연결되고, AP는 100Mbps 속도의 유선망을 이용해 이더넷 스위치에 연결된다. 한편 성능 측정 실험에 사용할 두 개의 FTP 서버를 그림과 같이 이더넷 스위치에 직접 연결하여 전체적으로 dumbbell 구조의 시험망을 구성하였다. 특히, 보다 정확한 실험을 위해 STA로 사용되는 컴퓨터 (Windows XP)에서는 실험에 사용될 파일 업로드 트래픽 이외 다른 네트워크 트래픽을 발생시킬 가능성이 있는 모든 시스템 차원의 서비스 (예를 들면, 각종 자동 업데이트 서비스와 SSDP Discovery Service 등)를 중지시켰다. 또한 AP는 MAC 주소 필터를 사용하

이러한 기존 무선랜과의 간섭을 배제하기 위해 실험은 주말과 야간에 이루어졌으며 시험 결과를 확인할 때 주위의 무선랜 망과의 트래픽 간섭을 철저히 확인하였다. 한편, STA-A는 AP와 6 미터, 그리고 STA-B는 AP와 3 미터 떨어진 지점 NOS (Line of Sight)에 설치하고 무선랜 트래픽 캡처 장비 (WS: Wireless Sensor) 안테나는 AP와 바로 인접한 위치에 설치하였다. 무선랜 시험망에서 STA에 사용된 무선랜 카드와 AP는 동일 무선랜 칩을 사용하는 동일 회사 제품으로 선정하였다.

<그림 8> IEEE 802.11g infrastructure 무선랜 (BSS) 시험망

<그림 7>의 STA는 제4장에서 얻어진 분석적 모델 결과와 비교하기 위해 무선랜 카드의 링크 속도를 54 Mbps로 고정하여 AF (Automatic Fallback) 알고리즘 [9]에 의해 링크속도가 변화하는 것을 방지하였다. 또

Hierarchy (Channel/ESSID/AP-Station)	MAC Address	Bits/s	Packets/s	Signal (dBm)	Noise (dBm)	A/B/G/N	Encryption Type	Last Seen
- Channel: 3437 MHz [6G 066]	[12]	1.56M	193.32	-57	-100		[2]	2011-01-02 오후 5:03:08
+ ESSID: 00:08:0F:7A:F0:00	[5]	1.89K	1.50	-67	-100		[2]	2011-01-02 오후 5:03:08
+ ESSID: drink	[1]	154.71	0.18	-69	-100		[1]	2011-01-02 오후 5:02:59
+ ESSID: HangS	[1]	15.92K	8.26	-54	-100		[1]	2011-01-02 오후 5:03:08
+ ESSID: 1ptime-woodpecker	[1]	163.87	0.16	-83	-100		[1]	2011-01-02 오후 5:02:53
- ESSID: kangHome	[3]	5.44M	670.63	-27	-100		[1]	2011-01-02 오후 5:03:08
+ AP-Station: AP	[1]	615.77K	904.24	-34	-100		[1]	2011-01-02 오후 5:03:06
- AP-Station: STA	[2]	7.04M	592.76	-25	-100		[1]	2011-01-02 오후 5:03:06
	EfinNetwork_f0	17.42M	1.47K	-48	-100	G	None	2011-01-02 오후 5:03:08
	EfinNetwork_f0	7.23	0.03	-12	-100	B	None	2011-01-02 오후 5:02:20
	EfinNetwork_f0	3.71M	306.79	-16	-100	G	None	2011-01-02 오후 5:03:00
+ ESSID: myLGNet	[2]	4.23K	3.94	-65	-100		[1]	2011-01-02 오후 5:03:08
Summary	[12]	1.56M	193.32	-57	-100		[2]	2011-01-02 오후 5:03:08

<그림 7> WS에 감지된 채널 6를 사용하는 무선랜 시험망 주위 BSS

여 실험에 사용되고 있는 STA를 제외한 어떤 STA와도 연결이 되지 않도록 하였다. 그러나 시험망을 구성하여 실제 성능을 측정하는 만큼 이미 주위에 운영되고 있는 무선랜과의 간섭은 피할 수 없는 사실이다.

한 AP와 STA는 6 미터 이내 LOS로 연결되어 <그림 8>에서 보듯이 AP에서 이들 STA의 수신신호 강도가 각각 -48dBm (STA-A) 과 -16dBm (STA-B)으로 조사되었다. 이러한 수신신호 강도는 시험망에서 사용

하는 무선랜 카드와 AP가 54 Mbps 고정 전송율에 동작하는데 전혀 문제없다는 것을 제품사양을 통해 확인하였으며, 제5.2절 실험 결과에서도 검증하였다. AP의 채널은 자동으로 선택하게 한 결과 채널6을 선택하였다. Akella et al.[10]는 몇몇 AP 제품들의 표준 채널이 채널6이며, 이로 인해 설치되는 AP의 약 60%가 채널6을 선택하여 동작하는 것으로 보고되고 있다.

다음은 제품 구입 시 설정된 디폴트 파라미터 값으로 운용되는 무선랜 시험망에서 DCF 처리율 분석과 관련하여 조사된 주요 사항들이다.

- ERP 정보: no Non-ERP STAs
- Capability 정보: DSSS-OFDM modulation not allowed, short slot time in use
- Beacon 프레임 주기: 100 msec
- Beacon 프레임 전송 속도: 1Mbps
- RTS와 Fragmentation: 비활성화

<그림 8>은 WS에 감지된 시험망 주위에 채널6을 사용하는 AP를 보여준다. 그림에서 보듯이 시험망 BSS KangHome 이외에 5개의 AP가 채널6을 사용하고 있다. 그러나 현재 시험 중인 AP를 제외하면 발생하는 트래픽의 양이 아주 적으며 전부 beacon 프레임을 포함한 무선랜 관리용 트래픽으로 확인되었다. 한편, 실험에 사용된 트래픽은 STA에서 각 파일서버로 파일 업로더를 수행하였다. 즉 STA-A에서 Poisson으로 264Mbytes의 큰 파일 사이즈를 업로더하는 상황에서 STA-B에서 Erlang으로 24 Mbytes의 파일을 업로더함으로써 무선랜에서의 시스템 처리율이 어떻게 변화하는지 살펴보았다.

4.2 실험 결과

<그림 9>는 STA-A와 STA-B로부터 전송된 트래픽을 bit/sec 단위로 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이 STA-A (빨간색) 전송률은 STA-B (녹색)의 트래픽 전송이 시작되면 전송률이 약 1/2 이하로 감소했다가 STA-B 전송이 완료되는 시점에 다시 전송률이 복원됨을 확인할 수 있다. STA-A만 동작하는 경우 전송률이 평균 21.44 Mbps, 그리고 두 STA가 동시에 전송하는 경우 시스템 전체 전송률이 평균 24.43

Mbps가 된다. 따라서 IEEE 802.11g 54 Mbps 전송율에 정규화하면 $n=1$ 일 때 처리율은 0.397, 그리고 $n=2$ 일 때 처리율은 0.452가 된다. 이러한 실험 결과는 <그림 6> $P_b = 10^{-6}$ 에서 조사된 분석적 모델에 의한 n 이 1과 2에 대한 처리율 0.358과 0.419를 각각 비교하면 상당히 근접한 결과임을 확인할 수 있다. 그러나 분석적 모델이 트래픽 발생을 포화상태를 가정한 것임을 고려하면, 우리의 예상과는 달리 실험에 의한 처리율이 분석적 모델에 의한 처리율과 비교해 약간 큰 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 실험에 사용된 파일 업로더 시 프레임 길이가 대부분 1500 바이트로 패킷 페이로더의 차이로 판단된다. 한편 <그림 9>에서 STA-A와 STA-B가 동시에 트래픽을 발생하는 경우, STA-A가 STA-B에 비해 상대적으로 처리율이 낮아지는 이유는 <그림 7>과 <그림 8>에서 보듯이 AP와 STA 사이 거리의 차이로 인해 AP에 수신되는 신호 전력 차이로 인한 성능저하로 예상된다.

<그림 10>은 정상 프레임과 재전송 프레임의 발생률 (단위는 초당 프레임 수)을 보여준다. STA-A와 STA-B가 동시에 전송을 시도하는 시점에서 프레임 충돌확률이 증가하게 되며 이로 인한 재전송 프레임 발생률이 약 2배 증가하게 된다.

<그림 9> STA-A와 STA-B의 데이터 전송률 (bit/sec) (빨강: STA-A, 녹색: STA-B)

<그림 10> 채널 6의 정상 및 재전송 프레임 수 (frame/sec) (녹색: 정상 프레임, 빨강: 재전송 프레임)

5. 결 론

본 논문에서는 DCF 성능분석을 위한 기존의 분석적 모델들을 이용하여 무선 채널 상의 프레임 전송 오류 및 AP가 주기적으로 발생시키는 beacon 프레임 전송에 따른 성능 저하를 고려한 IEEE 802.11g 물리계층 ERP-OFDM 파라미터를 기준으로 DCF 처리율을 분석하였다. 조사된 DCF 처리율은 물리계층 ERP-OFDM 파라미터와 높은 데이터 전송률로 인해 기존 분석 결과와는 많은 차이를 보였다. 현재 우리가 사용하고 있는 대부분의 무선랜 카드 및 AP가 IEEE 802.11g 로 운용되고 있는 점을 고려하면, 본 논문을 통해 조사된 DCF 처리율은 실제 무선랜 운용 시 매우 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다. 또한, 본 논문에서는 시험용 무선랜을 dumbbell 구조로 설치하고, FTP 서비스를 제공하는 무선랜 트래픽을 캡처하여 각 STA의 처리율과 프레임 재전송을 분석하였다. 본 논문에서 수행된 실제 무선랜 시험망 시험결과를 보면 포화상태를 가정한 DCF 처리율 분석 모델이 상당한 수준에서 실제 적용 가능성을 직접 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] T. Paul and T. Ogunfunmi, "Wireless LAN Comes of Age: Understanding the IEEE 802.11n Amendment," IEEE Circuits and System Magazine, pp.28-54, 2008
- [2] 802.11g working group, "Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: Further higher data rate extension in the 2.4 ghz band," 2003, IEEE Standard.
- [3] IEEE 802.11 part II: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications, Aug. 1999.
- [4] D. Vassiss, G. Kormentzas, A. Rouskas, and I. Maglogiannis, "The IEEE 802.11g Standard for High Data Rate WLANs," IEEE Network Magazine, pp.21-26, May/June 2005.
- [5] 권수근, 정연준, 오연주, 백의현, 박광로 "WLAN 기반 네트워크에서 실시간서비스 지원을 위한 핸드 오프 방식", 한국산업정보학회논문지, Vol. 11, No. 3, pp. 1-9, 2006.
- [6] G. Bianchi, "Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol.18, pp.535-547, Mar. 2000.
- [7] Z. Tang, Z. Yang, J. He, and Y. Liu, "Impact of Bit Errors on the Performance of DCF for Wireless LAN," In Proc. of Communications, Circuits and System, pp.529-533, 2002.
- [8] E. Lopez-Aguilera, J. Casademont, and J. Cotrina, "IEEE 802.11g Performance in Presence of Beacon Control Frames," In Proc. of PIMRC 2004, pp.318-322, 2004.
- [9] J. Choi, J. Na, K. Park, and C. Kim, "Adaptive Optimization of Rate Adaptation Algorithms in Multi-Rate WLANs," In Proc. IEEE ICNP'07, 2007, pp.144-153.
- [10] A. Akella, G. Judd, S. Seshan, and P. Steenkiste, "Self-management in chaotic wireless deployments," In Proc. of Mobile Computing and

Networking, Aug. 2005.

- [11] T. Wang and H.H. Refai, "Empirical Network Performance Analysis on IEEE 802.11g with Different Protocols and Signal to Noise Ratio Values," In Proc. of Wireless and Optical Communications Networks, 2005, pp.29-33.
- [12] D. Malone, K. Duffy, and D.Leith, "Modeling the 802.11 Distributed Coordination Function in Non-saturated Heterogeneous Conditions," IEEE/ACM Trans. on Networking, Vol. 15, No. 1, pp.159-173, Feb. 2007.

강 구 홍 (Koo Hong Kang)

- 정회원
- 경북대학교 전자공학과 공학사
- 충남대학교 전자공학과 공학석사
- 포항공과대학교 전자계산학과 공학박사
- 서원대학교 정보통신공학과 부교수
- 관심분야 : 무선랜, 네트워크 보안, 성능평가

논문접수일 : 2011년 03월 12일

1차수정완료일 : 2011년 04월 02일

2차수정완료일 : 2011년 04월 08일

게재확정일 : 2011년 05월 25일