

무선 LAN의 페이딩채널 환경에서 Infrastructure모드와 Ad-hoc 모드의 DCF 처리율

정회원 이 하 철*

Throughput of DCF between Infrastructure Mode and Ad-hoc Mode over the Fading Channel in the Wireless LAN

Ha-cheol Lee* *Regular Member*

요 약

본 논문에서는 infrastructure 모드 및 ad-hoc 모드로 동작하는 페이딩 채널환경하의 IEEE 802.11a 무선 LAN에서 페이로드 크기에 따른 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) 기반 DCF(Distributed Coordination Function)의 처리율을 분석하였다. 단말수는 고정되고 각각의 단말은 항상 전송할 패킷을 가지고 있다고 하는 포화조건(saturation condition)을 가정한다. 특히 ad-hoc 모드의 무선 LAN에서는 노드가 이동하는 형태로서 이동속도와 캐리어 주파수를 갖고 채널 페이딩은 완만하고 상호연관성을 갖으며 이러한 성질은 패킷에 버스트 형태의 비트에러를 발생시킨다. 이러한 채널에서는 FEC(Forward Error Correction) 또는 인터리빙이 효율적이지 않을 수 있으며 채널상에 최적의 프레임 길이를 갖는 프레임을 전송하는 것이 좋은 방법일 수 있다.

Key Words : Wireless LAN; DCF; MAC; throughput

ABSTRACT

This paper analyzes the throughput performance of CSMA/CA-based DCF protocol for both infrastructure mode and ad-hoc mode under fading channels with payload size at the MAC layer in the 802.11a wireless LAN. The number of stations n is assumed to be fixed and each station always has packets for transmission. In other words, we operate in saturation conditions. In the ad-hoc mode, the nodes are mobile with typical speed and carrier frequency. Channel fading is slow and correlated, which usually causes burst errors in a packet. In such a channel, FEC or interleaving may not be effective and adapting frame length to the channel is a good scheme to improve performance.

I. 서 론

무선 LAN은 11 Mbps의 전송률을 지원하는 표준 규격 IEEE 802.11b의 완성과 이에 따른 저가의 관련 장치 개발, 그리고 휴대형 PC 및 PDA의 보급 확대 등에 따라 최근 관련시장이 큰 폭으로 성장하고 있으며, 또한 최대 54Mbps의 전송률을 지

원하는 5GHz 대역의 IEEE 802.11a 무선 LAN의 이용도 점차 활발해지고 있다. 현재 infrastructure 모드의 무선 LAN과 관련하여 최근 국내외 유무선 사업자들은 회의장, 공항, 호텔, 카페 등 이용자가 밀집되어 있는 핫스팟 지역에서 무선 LAN 기술을 이용한 고속 무선 인터넷 서비스 사업을 시작하고 있으며, 또한 무선 LAN을택내 무선망으로도 활용

* 유한대학 정보통신과(hclee@yuhan.ac.kr)

논문번호 : 08026-0505, 접수일자 : 2008년 5월 5일

하고 있다. 이와 같이 무선 LAN은 유선 LAN을 대체한다는 기존의 이용 개념을 넘어 공중 무선망과 맥네 무선망 등으로 그 영역을 확대하고 있으며, 또한 이동통신망과 점차 높은 수준으로 연동되어 이중모드 단말을 소지한 사용자는 핫스팟 지역에서 고속의 무선 LAN에 접속하고, 그 지역을 벗어나게 되면 자동적으로 전국적인 커버리지를 갖는 이동통신망에 접속할 수 있도록 하고 있다. 이러한 환경이 성숙되면 궁극적으로 하나의 단말을 가지고 가정, 사무실, 학교, 호텔, 공항 등 장소에 관계없이 고속의 무선인터넷 서비스를 이용할 수 있다^{1,2,3}. 이러한 시점에서 무선 LAN 단말이 AP(Access Point)를 이용하여 유선 LAN 또는 공중 셀룰러망에 접속됨으로서 유선 LAN에 접속되어 있는 서버는 물론 인터넷에 접속되어 있는 서버를 액세스할 수 있도록 하는 연구결과도 발표되고 있다³. 그리고 ad-hoc 모드로 동작하는 무선 LAN의 활용도도 높아지면서 상호 연관 페이딩 채널환경하의 802.11 DCF의 처리율도 관심의 대상이 되었다. Ad-hoc 모드의 네트워크에 대해서는 최근에 많은 연구가 이루어지고 있으며 제한된 주파수 자원으로 효율적인 MAC 프로토콜을 설계하는 방법이 주요 이슈인데 IEEE 802.11 DCF는 간단하며 견고하다는 이유로 인해서 ad-hoc 네트워크의 de facto MAC 프로토콜로 사용되고 있다. 이렇게 무선 LAN이 활발하게 사용되고 있는데 반해 최대 전송속도가 표준화 기술문서에서 언급되고 있지만 무선 LAN의 액세스 메커니즘, 오버헤드 및 무선환경 특유의 페이딩으로 인해 이용자가 체감하는 전송속도는 최대 전송속도에 훨씬 못 미치고 있다. 이러한 점을 감안하여 일부 논문에서는 비트 에러율에 영향을 받는 처리율을 1 Mbps급 IEEE 802.11 무선 LAN에 대해서는 분석하였지만 최대 전송속도로서 54 Mbps를 제공하는 IEEE 802.11a 무선 LAN에 대해서는 분석되어 있지 않다^{4,5}. 또한 IEEE 802.11a 무선 LAN에서 MSDU(MAC Service Data Unit) 크기에 따른 전송속도별 처리율을 분석하였지만 이는 무선 채널 특유의 페이딩 환경을 전혀 고려하지 않은 이상적인 경우이다^{6,7}. 기존의 많은 연구에서 이상적인 채널을 통한 IEEE 802.11 DCF의 성능을 평가하였는데 2차원 Markov 프로세스로 이진 지수함수의 특성을 갖는 백오프를 모델링함으로써 Bianchi는 성공적으로 802.11 DCF의 포화(saturation) 처리율을 얻었다⁸. Ad-hoc 모드 네트워크의 노드는 infrastructure 모드 네트워크의 노드와 달리 이동하는

형태로서 속도와 캐리어 주파수를 갖는다. 채널 페이딩은 완만하며 상호연관성을 갖고 이러한 특성은 패킷에 버스트 형태의 비트에러를 발생시킨다. 그러한 채널에서는 FEC 또는 인터리빙이 효율적이지 않을 수 있고 채널에 최적의 프레임 길이를 적용하는 것이 좋은 방법일 수 있다. 따라서 본 논문에서는 ad-hoc 네트워크의 MAC으로 사용하는 IEEE 802.11 DCF에 노드의 이동성을 고려하며 단말이 정지해 있는 infrastructure 모드와 단말이 이동하는 ad-hoc 모드의 IEEE 802.11a 무선 LAN에서 페이딩 채널환경을 고려한 MAC 계층의 CSMA/CA 기반 DCF 처리율을 분석하였다. II장에서는 IEEE 802.11a 무선 LAN의 구성과 프로토콜 계층구조를 분석하였다. III장에서는 두가지 동작 모드에 대해서 페이딩 채널환경의 처리율을 유도하였고 IV장에서는 3장의 내용을 기반으로 처리율을 구하여 결과를 분석하였다. V장에서는 내용요약과 함께 향후 연구 방향에 대하여 언급하였다.

II. 무선 LAN 기술

1. 무선 LAN 접속구조

무선 LAN은 LAN케이블을 대체하거나 혹은 보다 유연하게 확장할 수 있는 데이터 통신 시스템으로 RF(Radio Frequency)기술을 이용해 케이블 없이도 데이터를 주고 받을 수 있는 기술이다. 즉 케이블에 구속되지 않고도 이더넷이나 토큰링과 같은 전통적인 LAN 기술의 모든 장점과 기능들을 그대로 제공할 수 있다. 그림 1은 두가지 동작모드의 무선 LAN 구조를 나타내며 특히 AP는 802.11 프로토콜을 802.3 프로토콜로 변환하는 역할을 한다.

그림 2는 IEEE 802.11에서 제시하고 있는 물리 계층과 MAC 계층을 나타내고 있는데 각 계층의

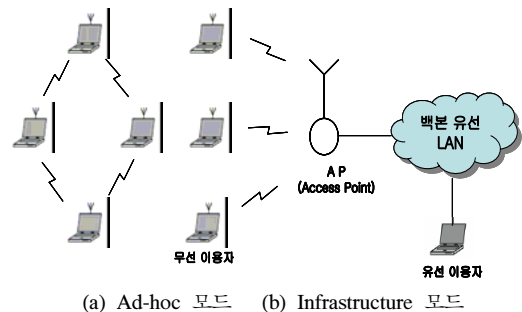


그림 1. 무선 LAN 구조
Fig. 1. Wireless LAN configuration

PDU(Protocol Data Unit)는 오버헤드를 포함한 전송 유닛을 의미하고 SDU(Service Data Unit)는 상위 계층에서 제공하는 페이로드를 말한다. MAC 계층에서는 MSDU(MAC SDU)에 MAC 계층 헤더와 FCS가 추가되어 MPDU(MAC PDU)를 구성한다. 802.11a 물리계층은 2.4 GHz 대역(ISM 대역)의 802.11, 802.11b, 802.11g와는 달리 5 GHz 대역(U-NII) 대역을 사용하며 6, 9, 12, 18, 24, 35, 48 및 54 Mbps의 전송속도를 지원한다^{5,6}. 물리계층은 PLCP (Physical Layer Convergence Protocol) 부계층과 PMD (Physical Medium Dependent) 부계층으로 구분된다. PLCP 부계층에서는 PLCP 프리앰블과 헤더가 MPDU에 추가되어 PPDU(PLCP PDU)를 형성하고 PMD 부계층에서는 IFS (InterFrame Space)와 BO(Back-Off) 시간간격이 오버헤드로 고려된다^{6,7}.

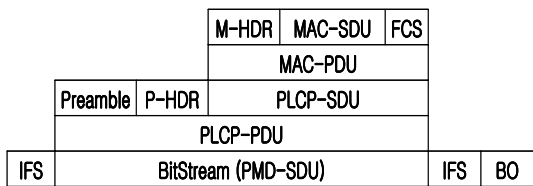


그림 2. IEEE 802.11의 물리계층과 MAC 계층 프로토콜 구조
Fig. 2. IEEE 802.11 physical and MAC layer

2. 무선채널 환경

2.1 고정 무선채널환경의 비트에러율

많은 무선 통신 채널에서는 LOS(Line-Of-Sight) 전송 경로를 가지고 있지 않으며 통신신호는 송신기에서 수신기까지 여러 반사된 경로를 통하여 전달된다. 이러한 현상을 다중경로 전파현상이라고 부르는데 다중경로이기 때문에 송신된 신호는 다른 크기와 위상을 갖고 서로 다른 시간에 수신기에 도달하게 된다. 이러한 다중경로에 의해 다중경로 페이딩이 발생하게 된다. 전송속도가 6 Mbps 및 12Mbps인 OFDM 시스템에서는 코드율 $r=1/2$ 이 사용되며 코드율이 $r=k/n$ 인 길쌈부호가 적용될 때 비트오율의 상한은 다음과 같다⁹.

$$P_b < \frac{1}{k} \sum_{d=d_{free}}^{\infty} B_d P_d \tag{1}$$

여기서 d_{free} 는 길쌈부호의 자유거리(free distance)를 말하고, B_d 는 가중치 d 경로상의 모든

정보비트의 총수를 나타내고, P_d 는 가중치 d 경로가 전송 시퀀스로 선택될 확률, 그리고 k 는 단위 블럭당 정보비트의 수를 말한다. B_d 및 d_{free} 는 길쌈부호의 파라미터이며 P_d 는 변조방식, 채널 및 판정방식에 따라 결정된다. 구속장 및 코드율이 주어지면 B_d 가 구해진다. 일반적으로 식 (1)에서 지배적인 첫5번째 항까지만 고려하므로 식(1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_b < \frac{1}{k} \sum_{d=d_{free}}^{d_{free}+4} B_d P_d \tag{2}$$

경관정에서는 해밍거리가 메트릭으로 사용되며 모든 제로 경로가 송신되었다고 가정한다. d 가 홀수 일 때 수신된 시퀀스의 오류개수가 $(d+1)/2$ 보다 적다면 모든 제로 경로는 올바르게 선택 되어질 것이고 그렇지 않다면 잘못된 경로가 선택되어질 것이다. 따라서, d 가 홀수일 때 잘못된 경로가 선택될 확률은 다음과 같다.

$$P_d = \sum_{i=\frac{d+1}{2}}^d \binom{d}{i} p_i (1-p)^{d-i} \tag{3}$$

여기서 p 는 채널비트 에러율이다. d 가 짝수 일 때, 에러 개수가 $d/2$ 을 초과하면 그릇된 경로가 선택되어지고, 만약 에러 개수가 $d/2$ 와 같다면 두 경로의 메트릭은 동일하게 된다. 이러한 경우 무작위로 어느 한 쪽을 선택하게 되고, 따라서 그 중 절반은 오류가 발생할 수 있다. 결과적으로 d 가 짝수 일 때 그릇된 경로를 선택할 확률은 다음과 같다.

$$P_d = \sum_{i=\frac{d}{2}}^d \binom{d}{i} p^i (1-p)^{d-i} + \frac{1}{2} \binom{d}{d/2} p^{d/2} (1-p)^{d/2} \tag{4}$$

$\bar{\gamma}_b = \bar{E}_b / N_o$ 는 평균 수신 단위비트당 에너지 대 잡음전력밀도이고 r 이 코드율 이라면 IEEE 802.11a 표준 OFDM시스템의 AWGN 환경에서 BPSK/QPSK의 i^{th} 부 채널의 에러율은 다음과 같다.

$$p_i = Q\left(\sqrt{2r\bar{\gamma}_{b_i}}\right) \tag{5}$$

여기서 $\overline{\gamma_{b_i}}$ 는 i^{th} 부 채널의 평균 수신 단위비트당 에너지 대 잡음전력밀도이기 때문에, 총량 P 는 각 N 개 OFDM 부 채널의 평균 에러율이 된다.

$$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i \quad (6)$$

여기서 N 은 48또는 24개의 독립적인 부반송파라고 가정한다. 페이딩이 없다면 ($\overline{\gamma_{b_i}} = \overline{\gamma_b}$) $P_i = P$ 가 된다. 식(5)를 이용, 식(3) 또는 식(4)에 적용한 결과를 식(2)에 활용하면, AWGN환경에서 BPSK/QPSK의 성능을 얻을 수 있다. 채널부호화를 적용한 경우와 적용하지 않은 경우에 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\overline{\gamma_{b_c}} = r\overline{\gamma_b} \quad (7)$$

따라서 라이시안 페이딩 채널상에서의 BPSK/QPSK i^{th} 부 채널의 채널비트 에러율은 다음과 같다⁹⁾.

$$P_i \approx \frac{1}{2\sqrt{\pi c_1}} \left(\frac{\zeta_i + 1}{r\overline{\gamma_{b_i}} + \zeta_i + 1} \right)^d \exp\left(\frac{-d\zeta_i r\overline{\gamma_{b_i}}}{r\overline{\gamma_{b_i}} + \zeta_i + 1} \right) \quad (8)$$

여기서, $c_1 = 1.2 + 0.1\zeta$ 는 실험적으로 얻어지며 $d=1$ 이다. 페이딩이 없거나 또는 모든 부 반송파가 동일한 페이딩을 겪는다면 ($\zeta_i = \zeta$, $\overline{\gamma_{b_i}} = \overline{\gamma_b}$) $P_i = P$ 가 된다. ζ_i 는 i 번째 부 채널에서 직접 수신된 신호와 산란되어 수신된 신호의 전력비이다. 식(8)을 이용, 식(3) 및 식(4)에 적용한 결과를 식(2)에 활용하면 라이시안 페이딩 채널환경에서 BPSK/QPSK의 BER 성능식을 얻을 수 있다.

24 Mbps의 전송속도에 도달하기 위하여 IEEE 802.11a에서는 $r=1/2$ 의 코드율을 갖는 16QAM을 사용한다. BPSK 및 QPSK에서 분석하였던 것과 마찬가지로 16QAM의 부반송파를 사용하는 OFDM 시스템의 성능분석도 유사한 방법으로 이루어진다. MQAM의 i 번째 부 채널에서는 다음과 같이 근사된 채널의 BER을 얻을 수 있다⁹⁾.

$$P_i \approx \frac{4 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \cdot e^{-d \cdot \zeta_i \left[\frac{3qr\overline{\gamma_b}}{3qr\overline{\gamma_{b_i}} + 2(M-1)(\zeta_i + 1)} \right]}}{q\sqrt{2\pi c_2} \left[\frac{3qr\overline{\gamma_{b_i}} + 2(M-1)(\zeta_i + 1)}{2(M-1)(\zeta_i + 1)} \right]^d} \cdot \frac{2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right)^2 \cdot e^{-d \cdot \zeta_i \left[\frac{3qr\overline{\gamma_b}}{3qr\overline{\gamma_{b_i}} + 2(M-1)(\zeta_i + 1)} \right]}}{\pi c_2 q \left[\frac{3qr\overline{\gamma_{b_i}} + (M-1)(\zeta_i + 1)}{(M-1)(\zeta_i + 1)} \right]} \quad (9)$$

여기서, $c_2 = 2.6 + 0.1\zeta$ 는 실험치 이고, ζ_i 는 i 번째 부 채널에서 직접 수신된 신호와 산란되어 수신된 신호의 전력비이고, HDD상에서 $d=1$ 이다. 채널 페이딩이 없거나 모든 부 채널에서 같은 페이딩이 존재한다면 $P_i = P$ 이다. 식 (3)과 식 (4)에 $q \geq 4$ 일 때의 식 (9)를 이용하여 식 (2)에 활용하면 Ricean 페이딩 채널하에서 HDD방식에 의한 square MQAM의 성능을 얻을 수 있다. 부호율 $r=3/4$ 이고 전송속도가 54Mbps인 경우에는 식 (9)에서 $q=6$ 인 것을 제외하면 16 QAM과 같은 방식으로 Ricean 페이딩 채널환경에서 64QAM의 성능을 분석할 수 있다.

2.2 이동 무선채널환경의 프레임 에러율

본 논문에서는 Jake 스펙트럼을 갖는 평탄한 페이딩을 갖는 Rayleigh 채널을 가정한다. 수신신호 전력레벨의 임의 임계치에 따라 채널은 페이딩 또는 페이딩사이의 상태에 있다. 전체 프레임이 페이딩사이의 상태에 있거나 하면 프레임 전송이 성공적으로 이루어진다. 프레임의 임의 부분이 페이딩 상태에 있으면 프레임은 에러 상태로 수신된다. R_{req} 를 요구되는 수신전력레벨이라고 하고 R_{rms} 를

수신된 평균전력레벨이라고 하면 $\rho = \frac{R_{req}}{R_{rms}}$ 는 페이딩 마진이 된다. $\rho < -10\text{dB}$ 인 경우 페이딩 간격과 페이딩 사이의 간격은 지수분포로 나타내 질 수 있다. 위 가정과 함께 T_{pi} 를 프레임 간격이라고 하면 프레임 에러율 FER은 식 (10)과 같이 주어진다⁹⁾.

$$FER = 1 - \frac{T_i}{T_i + T_f} P(t_i > T_{pi}) \quad (10)$$

t_i 는 페이딩사이의 간격, t_r 는 페이딩 간격, T_i 는 랜덤변수 t_i 의 평균값, T_r 는 랜덤변수 t_r 의 평균값, $P(t_i > T_{pi})$ 는 페이딩 사이의 간격이 T_{pi} 보다 더 오래 지속될 확률을 말한다. t_i 에 대해서 지수분포를 가정하면 $P(t_i > T_{pi}) = \exp(-\frac{T_{pi}}{T_i})$ 가 된다. Rayleigh 페이딩 채널의 경우 평균 페이딩 사이의 간격은 식 (11)과 같이 주어진다.

$$T_i = \frac{\exp(\rho) - 1}{fd\sqrt{2\pi\rho}} \quad (11)$$

$T_i + T_r$ 는 $\frac{1}{N_f}$ 를 의미하고 N_f 는 레벨 횡단율이며 $fd\sqrt{2\pi\rho} \exp(-\rho)$ 로 표현되고 여기서 f_d 는 최대 도플러 주파수로 $\frac{v}{\lambda}$ 로 구해진다. v 는 이동속도, λ 는 파장을 의미하며 FER은 식 (12)와 같다.

$$FER = 1 - \exp(-\rho - fd\sqrt{2\pi\rho}T_{pi}) \quad (12)$$

FER은 페이딩 마진(수신기 구조에 관련), 최대 도플러 주파수(이동속도 및 캐리어 주파수에 관련) 및 프레임 간격(송신 노드에 관련)에 의해서 결정된다. 만약 FER을 얻기 위하여 페이딩 마진과 최대 도플러 주파수는 동적으로 제어하기가 어렵기 때문에 유일한 제어 파라미터는 프레임 간격이 된다. 기본 액세스 모드에 대해서 프레임 간격 T_{pi} 는 $T_H + T_L + T_{ACK}$ 이다. T_H 는 물리계층의 프리앰블 전송시간과 PLCP 헤더 전송시간 및 MAC 계층 헤더 전송시간의 합이고 T_L 은 페이로드인 MSDU 전송시간, T_{ACK} 는 ACK 프레임 전송시간을 의미한다. FER 수식에 T_{pi} 를 대입하면 FER 값을 구할 수 있다.

2.3 DCF 프로토콜 동작 분석

IEEE 802.11 MAC프로토콜은 시간축상에서 교대로 이용되는 PCF(Point Coordination Function)와 DCF의 두가지 동작모드를 지원한다. PCF는 비 경쟁방식으로서 시간적으로 제약적인 서비스에 이용되고 DCF는 경쟁기반의 CSMA/CA기법을 이용하며 비동기적인 데이터 전송에 주로 이용된다¹¹⁾. 802.11 MAC 프로토콜은 5개의 시간간격을 정의한다.

SIFS(Short InterFrame Space)와 슬롯시간은 물리계층에 의해서 결정되는 것이고 PIFS(Priority InterFrame Space), DIFS(Distributed InterFrame Space) 및 EIFS(Extended InterFrame Space)는 SIFS와 슬롯시간 기반하에서 정의된다. IEEE 802.11a의 경우에 SIFS 시간간격은 16 μ sec, 슬롯시간은 9 μ sec, DIFS 시간간격은 34 μ sec가 된다. 슬롯시간은 신호 전파 및 처리 지연현상을 고려한 수치이다. PIFS는 SIFS에 하나의 슬롯시간을 추가한 시간간격(25 μ sec)이고 DIFS는 SIFS에 2개의 슬롯시간을 추가한 시간간격(34 μ sec)이 된다. EIFS는 가장 긴 시간간격을 갖고며 데이터 프레임이 에러 상태로 수신될 경우 수신 단말이 ACK 프레임을 보내는 데 지장이 없도록 충분한 시간을 확보한다. DCF는 그림 3에서 보듯이 CSMA/CA 메카니즘을 이용하며 전송할 새로운 패킷이 있는 AP 또는 단말은 채널이 사용되고 있는지를 모니터링한다. 채널이 DIFS 시간간격동안 휴지상태이면 AP 또는 단말은 패킷을 전송하기 시작한다. 이외는 달리 AP 또는 단말은 채널이 사용되고 있는지 휴지 상태인지를 계속 모니터링하고 DIFS 시간간격동안 채널이 휴지상태이면 슬롯시간 단위로 채널 시간을 처리하여 슬롯시간 단위로 랜덤 백오프 시간간격을 발생시킨다. 그리고 채널이 사용중인지 휴지상태인지를 계속 모니터링하는 데 각 슬롯시간 동안에 아직도 채널이 휴지상태라고 하면 백오프 시간간격은 하나씩 감소하게 된다. 백오프 시간간격이 0인 경우에 AP 또는 단말은 패킷을 전송하게 된다. 이러한 백오프 기간동안 채널이 슬롯시간에서 사용중이라면 백오프 간격이 감소되는 것은 정지되고 채널이 DIFS 시간간격과 한개의 슬롯시간 간격동안 휴지상태라고 감지된 후에만 동작하게 되며 백오프 시간간격이 0인 경우에 또 다시 패킷이 전송되기 시작한다. 이러한 백오프 기법은 채널이 사용중이라는 것을 인식하게 되므로 충돌 현상을 피할 수 있도록 하는 기법이다. 더욱이 채널의 캡쳐 현상을 피하기 위하여 AP 또는 단말은 채널이 DIFS 시간간격동안 휴지상태라고 해도 2개의 새로운 패킷이 연속적으로 전송되는 경우 백오프 시간동안 대기하게 된다. DCF의 백오프 메카니즘은 지수함수 특성을 갖고 있는 데 각각의 패킷이 전송되는 경우 슬롯시간 단위의 백오프 시간은 패킷전송 실패 횟수에 따라 정해진다. 패킷이 처음으로 전송되는 경우는 최소 충돌 윈도우 값인 $CW_{min} = 15$ 로 설정되고 패킷 전송이 실패할 경우 백오프 시간은 $CW_{max} = 1023$ 의 범위내에서 2배로

증가한다. 그리고 패킷전송이 성공적으로 이루어진 경우 수신단말은 ACK 신호를 보내게 되며 헤더의 내용을 간단히 하기 위하여 ACK 신호는 순서번호를 포함하지 않으며 수신한 패킷에 대해서 즉시 응답하는 stop-and-go 프로토콜 기반하에서 데이터를 교환한다. 송신단말은 패킷전송을 완료한 후 16 μ sec SIFS 시간간격내에 ACK 신호를 수신해야 된다. 송신단말이 정해진 ACK_타임아웃 기간내에 ACK 신호를 수신하지 못하거나 채널에 다른 패킷이 전송되는 것을 감지하게 되면 패킷전송이 실패한 것으로 간주하며 백오프 메카니즘에 의한 재전송 절차를 따르게 된다. 802.11 MAC 프로토콜은 물리계층의 채널 감지기법외에 채널이 휴지상태로 되기 전에 남아 있는 시간의 양을 각 단말에게 알려주는 NAV(Network Allocation Vector) 기법을 구현한다. 이러한 NAV 기법을 가상 캐리어 감지기법이라고 하며 MAC 프로토콜은 충돌현상을 피하기 위하여 물리 및 가상 감지기법을 이용하는 것이다. 지금까지 언급한 방법들은 two-way handshaking 기법인데 four-way 프레임 교환 프로토콜로서 RTS/CTS 기법이 있다. 이는 hidden 터미널 문제를 해결하기 위한 기법으로서 RTS 신호를 송신한 단말은 AP로부터 SIFS 시간동안에 CTS 신호를 수신하게 되어 패킷을 전송하게 된다^[3].

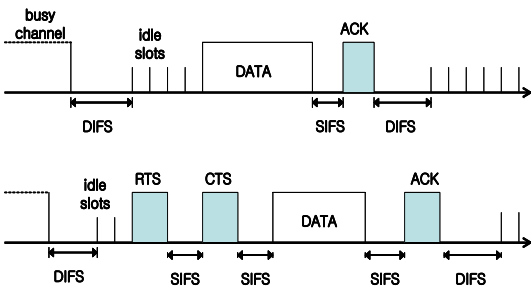


그림 3. IEEE 802.11a 의 DCF 프로토콜 동작
Fig. 3 The operation of IEEE 802.11a DCF protocol

III. DCF 처리를 해석

3.1 IEEE 802.11a 파라미터

Infrastructure 모드 및 ad-hoc 모드로 동작하는 페이딩 채널환경하의 IEEE 802.11a 무선 LAN에서 페이로드 크기에 따른 CSMA/CA기반 DCF의 처리율을 비교 분석하기 위하여 사용한 IEEE 802.11a 등의 파라미터값은 표1과 같다.

표 1. IEEE 802.11a등의 파라미터
Table 1. IEEE 802.11a parameter

파라미터	내 용
MAC_h	MAC 헤더, 34 [바이트]
PHY_h	PLCP헤더, 5[바이트]
ACK	ACK 프레임길이, 112 비트+ PHY_h
n	단말수 : 5, 20, 50
전송속도	6,12,24,54 Mbps
T_{ACK}	ACK프레임 전송시간, 44,32,28,24 μ S (6,12,24,54Mbps에 대해)
∇	전파지연시간, 1 μ S
T_P	프리앰블 전송시간, 16 μ S
T_{PHY}	PLCP헤더전송시간, 4 μ S
T_{SYM}	심볼전송시간, 4 μ S
T_{slot}	슬롯시간, 9 μ S
T_{SIFS}	SIFS시간, 16 μ S
T_{DIFS}	DIFS시간, 34 μ S
T_{EIFS}	RIFS시간, 43 μ S
CW_{min}	최소윈도우크기, 15
CW_{max}	최대윈도우크기, 1023

3.2 패킷 전송 확률

$b(t)$ 를 어떤 주어진 단말에서의 백오프 타이머를 나타내는 확률적인 과정이라 하자. 이산적이고 정수 단위의 시간에서 $t, t+1$ 을 두 개의 연속적인 슬롯타임의 시작을 나타낸다고 하고 각 단말의 백오프 타임 카운터는 각 슬롯타임의 시작 부분에서 감소된다. 각 단말에서의 백오프 카운터의 값은 그것의 전송이력(얼마나 많은 재전송이 이전 패킷 전송시에 발생했는지 여부)에 의존 하므로 확률과정 $b(t)$ 는 비 마르코프 확률과정이다. 편의상 $W = CW_{min}$ 이라

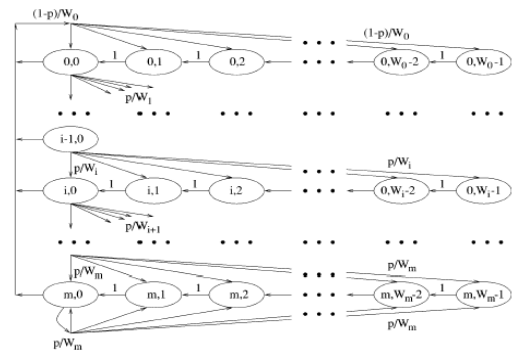


그림 4. 백오프 윈도우 크기 마르코프 체인 모델
Fig. 4 Markov chain model of backoff window size

정의하고 m 을 최대 백오프 단계라 하면 $cw_{\max} = 2^m W$ 가 된다. 또한 $w_i = 2^i W$ 라고 정의하며 여기서 $i \in (0, m)$ 는 백오프 단계라고 한다. 그리고 $s(t)$ 는 시간 t 에서 단말의 백 오프 단계 $(0, \dots, m)$ 를 나타내는 stochastic 확률과정을 나타낸다⁸⁾. 모델에서 전송된 패킷이 충돌하거나 성공적으로 전송되지 못할 확률 P 는 단말의 상태와는 무관하다고 가정한다. 이런 경우 편의상 bi-dimensional 과정은 이산 시간 마르코프 체인이 되며, 그림4에 나타내었고 오로지 비 공백의 한단계 천이 확률은 다음과 같다.

$$\begin{cases} P\{i, k | i, k + 1\} = 1, & k \in (0, W_i - 2); \quad i \in (0, m) \\ P\{0, k | i, 0\} = (1 - p) / W_0, & k \in (0, W_0 - 1); \quad i \in (0, m) \\ P\{i, k | i - 1, 0\} = p / W_i, & k \in (0, W_i - 1); \quad i \in (1, m) \\ P\{m, k | m, 0\} = p / W_m, & k \in (0, W_m - 1); \end{cases} \quad (13)$$

식(13)에서 첫번째 식은 백오프 시간이 각 슬롯 타임의 시작에서 감소 된다는 사실을 설명한다. 두 번째 식은 성공적으로 패킷 전달이 이루어진 다음의 새로운 패킷은 백오프 단계 0에서 전송이 시작됨을 설명하고 따라서 백오프의 시작은 구간 $(0, W_0 - 1)$ 에서 균일하게 선택된다. 나머지 두 개의 식은 성공적으로 전송되지 못한 경우의 모델을 나타내며, 특별히 백 오프 단계 $i - 1$ 에서 전송 실패가 발생되면 백오프 단계는 증가되고, 새로운 초기 백 오프 값은 구간 $(0, W_i)$ 에서 균일하게 선택된다. 결국, 네 번째 식은 일단 백 오프 단계가 m 에 도달되면 뒤 따르는 패킷 전송시에도 백오프 단계가 증가되지 않는 것을 나타내고 있다.

$$b_{i,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t) = i, b(t) = k\}, \\ i \in (0, m), k \in (0, W_i - 1)$$

이 체인의 정적 분포라고 할 때 체인의 규칙에 따라 다음의 관계가 성립한다.

$$b_{i,k} = \begin{cases} p^i b_{0,0}, & k = 0; \quad i \in (0, m - 1) \\ \frac{p^m}{1 - p} b_{0,0} & k = 0; \quad i = m \\ \frac{W_i - k}{W_i} b_{i,0} & k \in (0, W_i - 1); \quad i \in (0, m) \end{cases} \quad (14)$$

$b_{0,0}$ 의 값은 정규 조건을 적용하여 결정된다.

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{W_i-1} b_{i,k} &= \sum_{i=0}^m b_{i,0} \sum_{k=0}^{W_i-1} \frac{W_i - k}{W_i} = \sum_{i=0}^m b_{i,0} \frac{W_i + 1}{2} \\ &= \frac{b_{0,0}}{2} \left[W \left(\sum_{i=0}^{m-1} (2p)^i + \frac{(2p)^m}{1 - p} \right) + \sum_{i=0}^{m-1} (p)^i + \frac{(p)^m}{1 - p} \right] \\ &= 1 \end{aligned} \quad (15)$$

이것으로부터, 다음을 얻을 수 있다.

$$b_{0,0} = \frac{2(1 - 2p)(1 - p)}{(1 - 2p)(W + 1) + pW(1 - (2p)^m)} \quad (16)$$

이제 확률 τ 는 단말이 랜덤하게 선택한 슬롯 타임에서 표현되게 할 수 있다. 백 오프 단계에 상관 없이 백 오프 타이머가 0일 때면 어떤 전송 사건도 발생할 수 있으므로 다음식이 얻어진다.

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{i,0} = \frac{b_{0,0}}{1 - p} = \frac{2(1 - 2p)}{(1 - 2p)(W + 1) + pW(1 - (2p)^m)} \quad (17)$$

그러나, 일반적으로 τ 는 성공하지 못할 확률 P (아직은 미지수)에 조건적으로 의존하므로 P 값을 찾기 위해서 전송된 패킷이 충돌될 확률을 알아야 할 필요가 생기며 이는 적어도 $n-1$ 개의 나머지 단말중 하나가 타임 슬롯에서 전송함을 의미한다. 이 문제를 간단히 하기 위해서 정상상태를 가정하며 정상상태에서 각각의 나머지 단말들이 τ 확률을 가지고 패킷을 전송하며 패킷 에러율 P_C 의 영향을 고려하면 다음을 얻을 수 있다.

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1} (1 - P_C) \quad (18)$$

식(18)을 역변환하여 $\tau^*(p) = 1 - \left(\frac{1-p}{1-P_C}\right)^{\frac{1}{n-1}}$ 을 얻을 수 있다. 이 수식과 식 (18)은 미지수 τ, P 의 비선형 시스템을 나타내며 이는 산술적인 방법에 의해 풀 수 있고 유일해를 가짐이 분명하다.

3.3. Infrastructure 모드 무선 LAN의 처리율

전송채널에서 발생하는 비트에러를 고려하여 처리율을 분석하며 단말수 n 은 고정되었다고 가정하고 각각의 단말은 항상 전송패킷을 가지고 있다고 가정한다. 다시 말해, 포화조건(saturation condition) 상에서 동작한다(예를 들면 전송 버퍼는 항상 비어 있지 않음)고 한다. 그리고 채널상에서 비트에러는 P_b 라는 확률로 랜덤하게 발생된다고 가정한다. 백 오프 확률상의 비트에러의 영향이 비트에러율 P_b 및 패킷크기 P 를 기반으로 해서 유도되며 랜덤하게 선정된 슬롯타임 내에서 단말의 패킷전송 확률 τ 가 분석되는데 이 확률은 CSMA/CA메커니즘에는 직접적으로 관련되어 있지 않지만 패킷 에러율 P_c 와 충돌확률에 관련되어 있다. 결국 CSMA/CA기반의 DCF 처리율은 τ 및 P_b 의 함수로 표현된다^[4].

CSMA/CA기법에서 물리계층 헤더와 MAC계층의 헤더를 포함하는 데이터 패킷은 패킷내부의 어느 한 비트라도 에러가 발생하면 재 전송되어야 한다. 편의상, 변수 P_c 를 패킷내의 에러때문에 백 오프가 발생할 확률로 정의하고 패킷내의 에러는 랜덤하게 발생한다고 가정하면 CSMA/CA 기법에서는 식 (19)와 같이 표현된다.

$$P_c = 1 - (1 - P_b)^{PHY_h + MAC_h + P + ACK} \quad (19)$$

S 를 채널이 페이로드 비트들을 성공적으로 전송하기 위해 사용된 시간의 비율로 계산되는 시스템의 처리율로 정의한다. P_{tr} 는 슬롯타임에서 적어도 하나의 전송이 발생될 확률로 하고 채널상에서 n 개의 단말이 경쟁하고 각 단말이 전송할 확률은 τ 이므로 다음식이 성립된다.

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^n \quad (20)$$

그리고 한 개의 단말만이 채널에 데이터를 전송하므로 전송이 성공적으로 이루어질 확률을 P_s 라고 하면 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$P_s = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}(1-P_c)}{P_{tr}} = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}(1-P_c)}{1-(1-\tau)^n} \quad (21)$$

결국 처리율 S 는 다음과 같이 표현된다.

$$S = \frac{E[\text{슬롯타임내에 전송된 페이로드 정보}]}{E[\text{슬롯타임의 길이}]}$$

슬롯타임에서 성공적으로 전송될 확률은 $P_{tr}P_s$ 이기 때문에 슬롯타임 내에서 페이로드 정보가 성공적으로 전송될 평균정보량은 $P_{tr}P_sP$ 이다, 평균 슬롯타임의 길이는 채널이 휴지상태일 확률 $1 - P_{tr}$, 전송성공확률 $P_{tr}P_s$, 충돌확률 $P_{tr}(1 - P_s)$ 을 고려하여 구해진다. 그러므로

$$S = \frac{P_s P_{tr} P}{(1 - P_{tr})T_{slot} + P_{tr}P_sT_s + P_{tr}(1 - P_s)T_c} = \frac{P}{T_s - T_c + \frac{T_{slot}(1 - P_{tr})/P_{tr} + T_c}{P_s}} \quad (22)$$

여기서, T_s 는 성공적으로 데이터가 전송되어 채널이 busy상태로 감지되는 평균시간이며, T_c 는 충돌상태인 동안에 각 단말이 채널을 busy로 감지할 평균시간을 나타내고 CSMA/CA기법인 경우 식 (23)과 같이 구해지며 Rate는 전송율을 나타낸다.

$$T_s = TDIFS + T_P + T_{PHY} + \frac{MAC_h + P}{Rate} + TSIFS + T_{ACK}$$

$$T_c = TDIFS + T_P + T_{PHY} + \frac{MAC_h + P}{Rate} + TEIFS \quad (23)$$

3.4 Ad-hoc 모드 무선 LAN의 처리율

네트워크는 n 개의 송신노드와 1개의 수신노드로 구성되어 있고 송신노드는 항상 전송할 패킷을 가지고 있는 포화조건하에 있다고 가정한다. τ 를 노드가 랜덤하게 선정된 슬롯타임에 패킷을 전송할 확률이라고 하고 p 를 패킷이 전송된 후 실패할 확률이라고 한다. 실패확률은 충돌 또는 채널 페이딩에 의해서 발생하므로 p 는 식 (24)와 같이 주어진다.

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1} (1 - FER) \quad (24)$$

P_{idle} 을 선택된 슬롯이 idle 상태인 확률이라고 하면 P_{idle} 은 다음과 같다.

$$P_{idle} = (1-\tau)^n \quad (25)$$

또한 P_{suc} 를 충돌 또는 채널 에러가 없을 때 노드가 패킷을 성공적으로 전송할 확률이라고 하면 다음과 같다.

$$P_{suc} = n\tau(1-\tau)^{n-1}(1-FER) \quad (26)$$

패킷이 충돌될 확률은 P_{co} 라고 하고 패킷이 전송중 에러가 발생할 확률을 P_{er} 이라고 하면 다음과 같이 표시된다.

$$P_{co} = 1 - (1-\tau)^n - n\tau(1-\tau)^{n-1} \quad (27)$$

$$P_{er} = n\tau(1-\tau)^{n-1}FER \quad (28)$$

표준화된 효율적인 처리율 S 는 다음과 같이 주어진다.

$$S = \frac{T_{efficient}P_{suc}}{P_{idle}T_{idle} + P_{suc}T_{suc} + P_{er}T_{er} + P_{co}T_{co}} \quad (29)$$

T_{idle} 는 idle 슬롯의 간격 T_{slot} , $T_{efficient}$ 는 페이로드의 간격 T_L , T_{suc} 는 패킷을 성공적으로 전송하는데 소요된 노드의 시간간격 $T_{DIFS} + T_{SIFS} + 2 \times \text{지연}(\nabla) + T_H + T_L + T_{ACK}$, T_{er} 은 패킷의 충돌이 발생하는데 소요된 노드의 시간간격 $T_{suc} + T_{slot}$, T_{co} 는 패킷전송시 에러가 발생한 경우에 소요된 노드의 시간간격 $T_{suc} + T_{slot}$ 를 의미한다. 여기서 ∇ 는 전파지연값이고 T_H 는 프리앰블 전송 시간과 PLCP 헤더 전송시간의 합이다.

IV. 페이로드 크기에 따른 DCF 처리율 분석

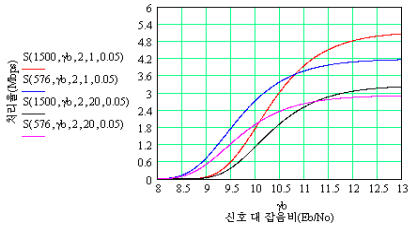
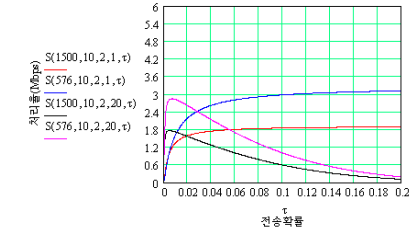
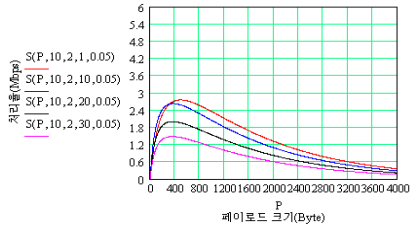
4.1 Infrastructure모드 무선 LAN의 처리율 분석

IEEE 802.11a의 OFDM 기반 무선 LAN의 DCF 처리율 성능을 분석하기 위해서 표 1의 시스템 파라미터를 이용하였다. IEEE 802.11a 의 전송속도는 6 Mbps, 12 Mbps, 24 Mbps, 54 Mbps로 한다. 패

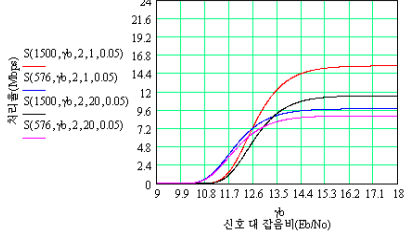
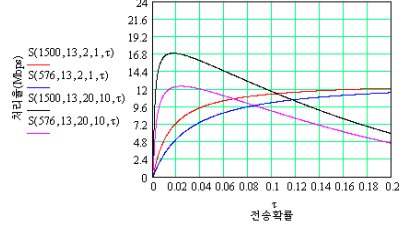
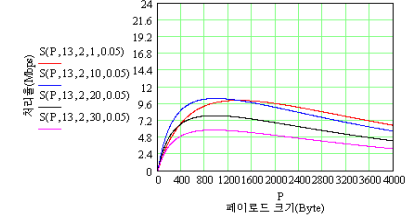
킷 크기는 일반적으로 Web Browsing 데이터인 경우 576 바이트, 이더넷의 최대 데이터 크기는 1500 바이트 정도 이므로 이를 대표적인 패킷크기로 이용하였다. 그림 5에서 $S(P, \gamma_b, \zeta, n, \tau)$ 는 전송속도 별로 페이로드 크기, 전송확률 및 신호 대 잡음비에 따른 처리율을 나타낸다. P 는 프레임의 페이로드 크기를 나타내고 $\gamma_b(E_b/N_0)$ 는 신호 대 잡음비를 나타내는데 전송속도 6 Mbps, 12 Mbps, 24 Mbps, 54 Mbps별로 각각 10 dB, 10 dB, 13 dB 및 23 dB로 설정하였다. 이는 그림 5의 전송속도별로 신호 대 잡음비에 따른 처리율 결과 그래프에서 함수가 서로 만나는 지점을 고려하여 선정하였다. ζ 은 복합 Rayleigh/Ricean 페이딩 환경에서는 0에서 10사이의 값을 갖는데 2로 설정하였다. 단말수는 1, 10, 20, 30을 이용하였고 전송확률 (τ)은 0.05로 가정하였다. 페이로드 크기에 따른 처리율 결과 그래프에서 보듯이 최대 처리율을 갖는 최적 페이로드 크기가 존재함을 알 수 있다. 6 Mbps급에 해당되는 그림 5a의 전송확률에 따른 처리율 결과 그래프에서는 페이로드 크기를 576 바이트로 했을 때의 처리율이 1,500 바이트로 했을때의 처리율보다 크다는 것을 알 수 있다. 이는 앞에서 설명한 페이로드 크기에 따른 처리율 결과 그래프에서 최적 프레임 크기와 연관된다는 것을 알 수 있다. 그리고 신호 대 잡음비에 따른 처리율 결과 그래프에서 보듯이 낮은 $\gamma_b(E_b/N_0)$ 에서는 페이로드 크기를 작게하는 것이 처리율을 높이는 방법이고 높은 $\gamma_b(E_b/N_0)$ 에서는 페이로드 크기를 크게하는 것이 처리율을 높이는 방법이라는 것을 알 수 있다.

4.2 Ad-hoc 모드 무선 LAN의 처리율 분석

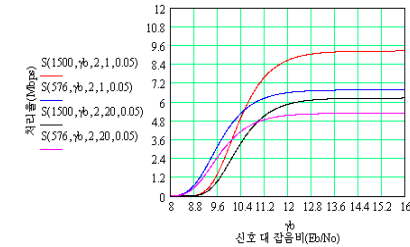
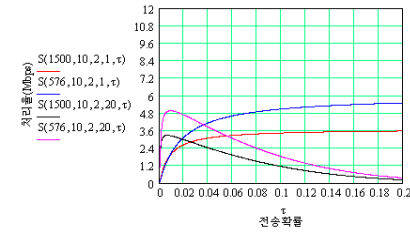
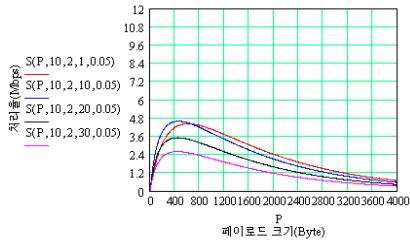
페이딩 채널환경에서 Ad-hoc 모드 네트워크의 프레임 에러율과 처리율을 그림 6과 같이 $FER(\rho, V, P)$ 과 $S(P, \rho, V, n, \tau)$ 로 나타내었다. 페이딩 마진 ρ 는 -20 dB, 캐리어 주파수는 5 GHz, 단말기의 속도 V 는 보행자 속도부터 이동체 속도(1.25 m/s - 25 m/s) 까지 고려하였다. 그리고 단말수 n 은 10, 단말기의 데이터 전송확률 τ 는 0.05로 하였다. 전송속도별 페이로드 크기에 따른 프레임 에러율 그래프에서 보듯이 프레임 에러율은 페이로드 크기에 비례해서 증가하고 단말기의 이동속도가 높을수록 증가하며 물리계층의 데이터 전송속도가 높을수록 감소한다는 것을 알 수 있다. 그리고 일반적으로 802.11 MAC에서 최대 프레임 에러율은 10%



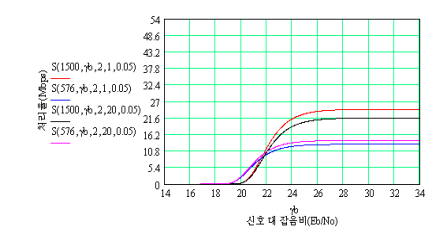
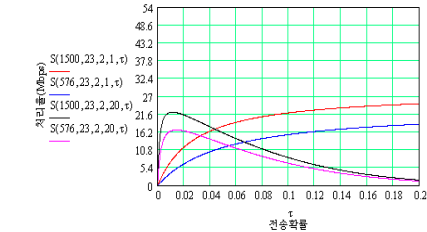
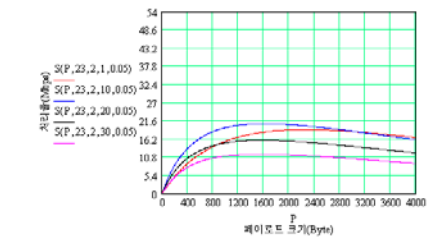
(a) 6 Mbps인 경우의 처리율



(c) 24 Mbps 인 경우의 처리율



(b) 12 Mbps인 경우의 처리율



(d) 54 Mbps 인 경우의 처리율

그림 5. Infrastructure 모드에서 페이딩 채널 환경의 처리율
Fig. 5 Throughput over fading channel in infrastructure mode operation

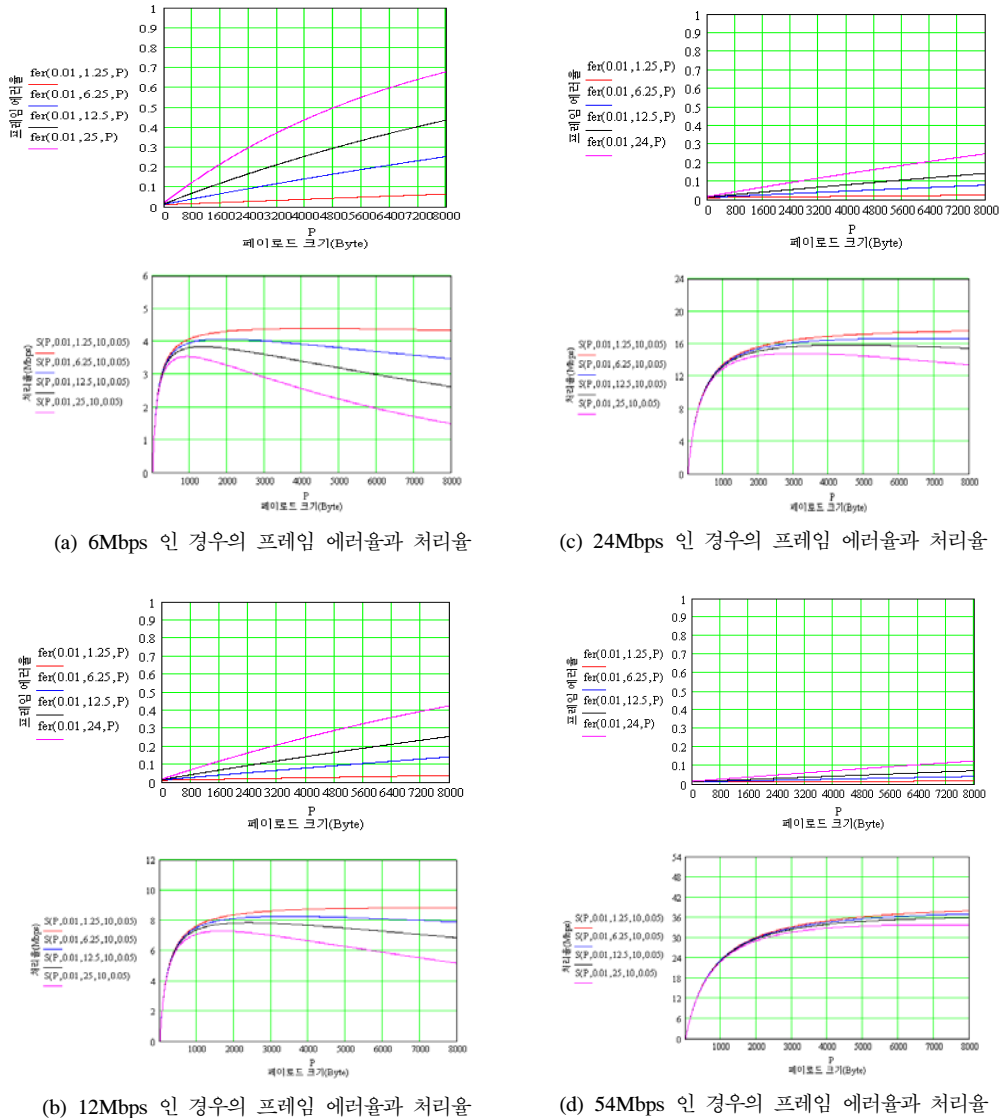


그림 6. Ad-hoc 모드에서 페이딩 채널환경의 프레임 에러율과 처리율
 Fig. 6 Frame error rate and throughput over fading channel in ad-hoc mode operation

로 요구되는데 예를들면 그림 6a의 프레임 에러율 그래프에서 보듯이 6Mbps 전송속도일때 단말기의 속도가 6.25 m/s인 경우 페이로드 길이는 2,650바이트를 초과해서는 안되며 25 m/s의 단말기 속도에 대해서는 페이로드 길이가 600바이트로 제한된다. 이것은 상호연관 페이딩 채널환경에서 802.11 DCF의 처리율을 최대로 하기 위해서는 최적의 길이를 갖는 페이로드를 전송해야 한다는 것을 의미한다. 처리율은 각각의 물리계층 데이터 전송속도에서 단말기 이동속도가 증가할수록 감소하며 단말기

의 이동속도별로 처리율을 최대로 하는 최적의 페이로드 크기를 갖는다는 것을 알 수 있다.

V. 맺음말

본 논문에서는 IEEE 802.11a 무선 LAN에서 주파수 선택적이고 완만하게 변하는 Rayleigh/Ricean 페이딩 채널환경을 고려하여 패킷의 페이로드 크기에 따른 MAC계층의 CSMA/CA 기반 DCF 처리율을 분석하였다. 특히 ad-hoc 모드의 네트워크

에서 상호연관 페이딩 채널을 통한 데이터 전송시 IEEE 802.11 DCF의 포화 처리율을 해석적인 방법으로 분석함으로써 처리율은 단말기 이동 속도의 증가와 함께 감소하며 일정한 데이터 전송속도하에서 처리율을 최대로 하는 최적의 페이로드 길이가 존재한다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 무선 LAN이 유선 LAN을 대체한다는 기존의 이용 개념을 넘어 공중 무선망과 택내 무선망 등으로 그 영역이 점차 넓어지는 시점에서 구내 및 공중 무선 LAN 설계와 구축 업무에 활용될 수 있다. 향후에 CSMA/CA 기반 시스템외에 RTS/CTS 기반 시스템의 처리율도 검토가 필요하며 에러율을 감소시키기 위한 에러제어기법의 적용, 기존의 DCF 성능을 개선하기 위한 QoS (Quality of Service)기술도 연구되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

[1] IEEE 802.11b, "Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification: High-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band," 1999.

[2] Upkar Varshney, "The Status and Future of 802.11-based WLANs," *IEEE Computer*, pp. 102-105, June 2003.

[3] Kin K. Leung, Bruce McNair, Leonard J. Cimini and Jack H. Winters, "Outdoor IEEE 802.11 Cellular Networks: MAC Protocol Design and Performance," *IEEE*, pp.595-599, 2002.

[4] Zuoyin Tang, Zongkai Yang, Jianhua He and Yanwei Liu, "Impact of Bit Errors on the Performance of DCF for Wireless LAN," *IEEE*, pp.529-533, 2002.

[5] XI Yong, WEI Ji-Bo and ZHUANG Zhao-Wen, "Throughput Analysis of IEEE 802.11 DCF over Correlated fading Channel in MANET," *IEEE*, pp.694-697, 2005.

[6] Jangeun Jun, Pushkin Peddabachagari and Mihail Sichitiu, "Theoretical Maximum Throughput of IEEE 802.11 and its Applications," *Proceedings of the Second IEEE International Symposium on Network Computing and Applications (NCA'03)*, 2003.

[7] Yang Xiao and Jon Rosdahl, "Throughput and Delay Limits of IEEE 802.11," *IEEE Communications Letters*, Vol.6, No.8, pp.355-357, August, 2002.

[8] Giuseppe Bianchi, "Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.18, No.3, pp. 535-547, March, 2000.

[9] Chi-han Kao, "Performance of the IEEE 802.11a Wireless LAN Standard over Frequency-selective, Slow, Ricean Fading Channels," *NPS Master's Thesis*, Sep., 2002.

이 하 철 (Ha-cheol Lee)

정회원



1983년 3월 한국항공대 통신공학과 학사
 1990년 8월 한국항공대 통신정보공학과 석사
 1999년 8월 한국항공대 통신정보공학과 박사
 1993년 12월 정보통신기술사

1983년 3월~1985년 6월 ETRI 연구원
 1985년 6월~1995년 8월 KT 선임연구원
 1995년 9월~현재 유한대학 정보통신과 부교수
 <관심분야> 홈 네트워킹, 컴퓨터 네트워킹, 무선 LAN 및 PAN