

라이시안 페이딩 채널환경에서 IEEE 802.11a 무선 LAN의 DCF 처리율

정회원 하 은 실*, 종신회원 정 진 옥*, 정회원 이 하 철**

Throughput rate of DCF Protocol based Ricean fading channel in the IEEE 802.11a wireless LAN.

Eun-Sil Ha* *Regular Members*, Jin-Wook Jung* *Lifelong Member*,
Ha-Chul Lee** *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 IEEE 802.11a 무선 LAN에서 주파수 선택적이고 완만하게 변하는 Ricean 페이딩 채널환경을 고려하여 E_b/N_0 및 BER에 따른 MAC(Medium Access Control) 계층의 CSMA/CA 기반 DCF(Distributed Coordination Function) 처리율을 분석하였다. 또한 처리율을 분석하는 데 단말수 및 MSDU(MAC SDU) 크기도 고려하였으며 IEEE 802.11a의 필수 전송속도인 6, 12, 24Mbps 및 54Mbps급에 대하여 검토한 결과 E_b/N_0 가 증가할 수록 BER이 감소할수록 처리율은 증가한다는 것을 알 수 있다.

Key Words : WLAN(무선랜), MAC, DCF(분산조정기능), OFDM

ABSTRACT

This paper explores the throughput performance of CSMA/CA-based DCF protocol over frequency-selective, slow Ricean fading channels with both the E_b/N_0 and BER at the MAC layer in the 802.11a wireless LAN. By exploring the throughput of DCF protocol with the data rate of 6Mbps, 12 Mbps, 24 Mbps and 54 Mbps, we find the fact that the higher the E_b/N_0 be and the less the BER be, the higher the throughput be.

I. 서 론

LAN의 정의는 매우 다양하며 각각의 정의에 따라 약간의 차이점이 있지만 일반적으로 큰 건물이나 지리적으로 한정된 거리에서 고속으로 데이터를 교환할 수 있는 통신망을 말한다. LAN은 1970년대 후반에 발명되어 통신의 환경을 급격하게 발전시키고 인터넷의 확산에 크게 기여하였다. 유선LAN의 경우 전송매체로 꼬임선, 동축케이블 및 광섬유를 이용하며 매체접근제어방식으로 IEEE 802.3의 CSMA/CD(Carrier Sense Multiple Access/Collision Detec-

tion)와 IEEE 802.4 및 802.5의 토큰제어방식을 이용한다. 전송속도 차원에서도 10 Mbps 및 100 Mbps의 전송속도를 제공하는 Ethernet LAN은 이미 상용화되어 널리 사용되고 있으며 최근에는 1 Gbps 및 10 Gbps급의 LAN이 개발되어 상용화되고 있다. 무선 LAN은 11 Mbps의 전송률을 지원하는 표준 규격(IEEE 802. 11b)의 완성과 이에 따른 저가의 관련 장치 개발, 그리고 휴대형 PC 및 PDA의 보급 확대 등에 따라 최근 관련시장이 AN이 유선 LAN에 접속되는 환경의 프로토콜 계층구조와 무선 실 내환경에 적용할 수 있는 Ricean 페이딩 환경에 대

* 성균관대학교 정보통신 연구실 (lcare@empal.co), ** 유한대학교 정보통신학과 (hcleee@yuhan.ac.kr)
논문번호 : KICS2004-08-147, 접수일자 : 2004년 8월 12일

하여 살펴보고 3장에서 IEEE 802.11a 무선 LAN의 CSMA/CA 기반 DCF(Distributed Coordination Function) 프로토콜의 동작을 살펴보았으며 4장에서는 2장과 3장에서 분석한 내용을 바탕으로 Eb/No와 BER에 따른 DCF 프로토콜의 처리율을 수식적으로 분석, 기존 논문에서 제시하고 있는 이상적인 채널 환경의 처리율과 시뮬레이션을 통해 비교분석 하였으며 5장에서는 내용요약과 함께 향후 연구방향에 대하여 언급하였다.

II. 유무선 LAN 접속구조 및 무선채널 환경

2.1 유무선 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 무선 LAN이 유선 LAN에 접속되는 구조를 나타내며 Access Point가 802.11 프로토콜을 802.3 프로토콜로 변환하는 역할을 한다.

그림 2는 IEEE 802.11에서 제시하고 있는 물리 계층과 MAC 계층을 나타내고 있는데 각 계층의 PDU(Protocol Data Unit)는 오버헤드를 포함한 전송 유니트의 길이를 의미하고 SDU(Service data Unit)는 상위 계층에 제공하는 페이로드의 길이를 말한다. MAC 계층에서는 MSDU에 MAC 계층 헤더와 FCS가 추가되어 MPDU를 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. 물리계층은 PLCP(Physical Layer Convergence Protocol) 부계층과

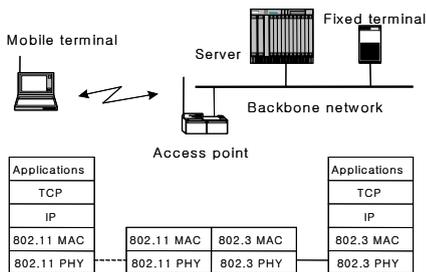


그림 1. 무선 LAN과 유선 LAN의 접속구조

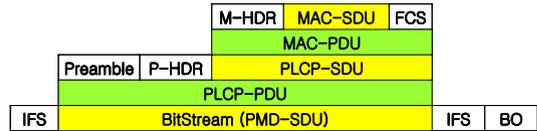


그림 2. 802.11의 물리계층과 MAC 프로토콜 계층구조

PMD(Physical Medium Dependent) 부계층으로 구분된다. PLCP 부계층에서는 PLCP 프리엠블과 헤더가 MPDU에 추가되어 PPDU가 형성되고 PMD 부계층에서는 IFS(InterFrame Space)와 BO(Back-off) 시간간격이 오버헤드로 고려된다.

2.2 무선채널 환경분석

많은 무선 통신 채널에서는 line-of-sight(LOS) 전송 경로를 가지고 있지 않다. 반면에 신호는 송신기에서 수신기까지 여러 반사된 경로를 통하여 전달된다. 이 현상을 multipath propagation 이라 한다. 다중경로이기 때문에 신호는 다른 크기와 위상 그리고 도착시간이 다르게 수신기에 도착하게 된다. 이런 다중경로에 의해 multipath fading이 발생한다. 무선통신 채널에서 수신된 신호의 크기 측면에서 multipath fading 효과는 두 가지 형태로 나뉜다. Large-scale fading과 small-scale fading 으로 나눌 수 있다.

small-scale fading이 생기는 두 가지 현상이 있는데, 첫 번째가 다중경로 때문에 생기는 신호의 시간 확산이고 두 번째가 동작에서 생기는 채널의 시간 변화이다. 신호의 시간확산은 주파수 선택적 페이딩이나 flat 페이딩을 야기하고, 채널의 시간 변화는 fast 페이딩이나 slow 페이딩을 야기한다. 시간 확산(dispersion) 작용을 표현하는 두 가지 밀접한 매개변수는 상관(coherence) 대역폭과 최대 초과 지연(maximum excess delay)이다. 상관 대역폭 B_c 는 채널의 왜곡이 없다고 생각되는 주파수 대역의 통계적 측정으로 구할 수 있다. B_c 와 T_m 은 아래와 같은 관계가 있다.

$$B_c \approx \frac{1}{T_m} \quad (1)$$

여기서 T_m 은 최대 초과 지연이고 첫 번째 신호와 마지막 신호 사이의 도착 시간차이이기도 하다. 최대 초과 지연은 다중경로 세기 분석도(MIP)로 정의된다. 그러나, T_m 은 일반적으로 채널을 표현하는데 가장 좋은 매개변수는 아니다. 왜냐하면, MIP가 T_m 의 같은 값에서 채널이 상당히 바뀔 수 있기 때문

이다. 좀더 실용적인 매개변수는 root-mean-square (rms) 지연 확산이다. 이는 아래에 정의 되어 있다.

$$\sigma_\tau = \sqrt{\overline{\tau^2} - \bar{\tau}^2} \quad (2)$$

여기서, $\bar{\tau}$ 는 평균 초과 지연이고 $\overline{\tau^2}$ 는 $\bar{\tau}$ 의 second 모멘트이다. B_c 와 σ_τ 사이에는 어떤 정해진 관계는 없다. 만약 B_c 가 0.5보다 큰 주파수 관계함수로 정해져 있는 대역폭을 정의하면, 경험적인 방식에 의해서 종종 다음과 같이 정의 되기도 한다.

$$B_c \approx \frac{1}{5\sigma_\tau} \quad (3)$$

만약 B_c 가 0.9보다 큰 주파수 관계함수로 정해져 있는 대역폭을 정의하면, 경험적인 방식에 의해서 종종 다음과 같이 정의 되기도 한다.

$$B_c \approx \frac{1}{50\sigma_\tau} \quad (4)$$

σ_τ 는 완벽한 LOS path없이 건물의 크기나 종류에 의존하는 값으로 정의 되어 있다.

만약 간섭 대역폭 B_c 가 전송된 신호의 대역폭 W 보다 작다고 할 때 수신 신호는 frequency-selective-fading을 겪을 것이다. 즉 채널이 frequency-selective이면

$$B_c < W \quad (5)$$

이것은 다음을 내포한다.

$$T_m > T_s \quad (6)$$

여기서, $B_c \approx 1/T_m$ 그리고 $W \approx 1/T_s$ 이다. 또한, $1/T_s = R_s$ 로 심볼 속도이다. 주파수 선택적 페이딩이 일어날 때 신호의 주파수 성분이 다르게 영향을 미치는 수신신호는 왜곡이 일어나게 된다.

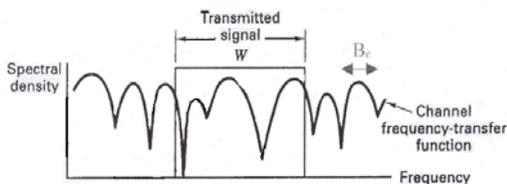


그림 3. Typical frequency-selective and flat fading ($B_c < W$)

다중경로 환경에서 수신된 신호의 크기는 랜덤한 값으로 표현된다. 전형적인 모델로는 Rayleigh, Rician이 있다.

2.3 Rayleigh 페이딩

잘 알려진 것처럼 좁고 급격한 크기의 파동을 Rayleigh 모델이라 하는데, 모든 전송된 신호 전력 이 다중경로 이기 때문에 송, 수신기 사이에서의 LOS가 없다. Rayleigh 페이딩 채널에서, 전송된 신호의 크기는 Rayleigh 랜덤 변동에 의해 모델링 된다.

$$f_{A_c}(a_c) = \frac{a_c}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{a_c^2}{2\sigma^2}\right), \quad a_c \geq 0 \quad (7)$$

여기서 $2\sigma^2$ 은 산란된 또는 LOS가 아닌 수신신호 전력을 나타낸다.

2.4 Rician 페이딩

Rician 모델은 전송된 신호 파워의 많은 부분이 다중경로이지만 송, 수신기 사이에 LOS가 존재한다. Rician 페이딩 채널에서는 전송된 신호의 크기가 Rician 랜덤 변동에 의해 모델링 된다.

$$f_{A_c}(a_c) = \frac{a_c}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{(a_c^2 + \alpha^2)}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{\alpha \cdot a_c}{\sigma^2}\right), \quad a_c \geq 0 \quad (8)$$

여기서 $I_0(\cdot)$ 은 0차의 Bessel 함수이다. α^2 은 직접적인 수신 또는 신호 파워의 LOS를 나타낸다. $2\alpha^2$ 은 LOS 신호 전력이 아님을 나타낸다. Rician 페이딩 채널에서 수신신호의 평균 전력은,

$$\overline{S^2(t)} = \overline{a_c^2} = \alpha^2 + 2\sigma^2 \quad (9)$$

이다. $\alpha \rightarrow 0$ 일 때, Rician pdf는 Rayleigh pdf와 같아진다. 또한 신호의 평균 수신 전력은 $2\alpha^2$ 로 줄어들게 된다.

III. DCF 프로토콜 동작 분석

IEEE 802.11 MAC 프로토콜은 시간축상에서 교대로 이용되는 PCF(Point Coordination Function)와 DCF(Distributed Coordination Function)의 두가지 동작모드를 지원한다. PCF는 비 경쟁방식으로서 시간적으로 제약적인 서비스에 이용되고 DCF는 경쟁 기반의 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access

with Collision Avoidance) 기법을 이용하며 비동기적인 데이터 전송에 주로 이용된다. 802.11 MAC 프로토콜은 5개의 시간간격을 정의한다. SIFS(Short InterFrame Space)와 slot time은 물리계층에 의해서 결정되는 것이고 PIFS(Priority InterFrame Space), DIFS(Distributed InterFrame Space) 및 EIFS(Extended InterFrame Space)는 SIFS와 slot time 기반 하에서 정의된다. SIFS 시간간격은 16 μ sec, slot time은 9 μ sec, DIFS 시간간격은 34 μ sec 가 된다. slot time은 신호 전파 및 처리 지연현상을 고려한 수치이다. PIFS는 SIFS에 하나의 slot time을 추가한 시간간격(25 μ sec)이고 DIFS는 SIFS에 2개의 slot time을 추가한 시간간격(34 μ sec)이 된다. EIFS는 가장 긴 시간간격을 갖으며 데이터 프레임이 에러 상태로 수신될 경우 수신 단말이 ACK 프레임을 보내는 데 지장이 없도록 충분한 시간을 확보한다.

DCF는 그림 3에서 보듯이 CSMA/CA 메커니즘을 이용하는 데 전송할 새로운 패킷이 있는 AP 또는 단말은 채널이 사용되고 있는지를 모니터한다. 채널이 DIFS 시간간격동안 휴지상태이면 AP 또는 단말은 패킷을 전송하기 시작한다. 이와는 달리 AP 또는 단말은 채널이 사용되고 있는지 휴지 상태인지를 계속 모니터하고 DIFS 시간간격동안 채널이 휴지상태이면 slot time 단위로 채널 시간을 처리하여 slot time 단위로 랜덤 backoff 시간간격을 발생시킨다. 그리고 채널이 사용중인지 휴지상태인지를 계속 모니터하는 데 각 slot time 동안에 아직도 채널이 휴지상태라고 하면 backoff 시간간격은 하나씩 감소하게 된다. Backoff 시간간격이 0인 경우에 AP 또는 단말은 패킷을 전송하게 된다. 이러한 backoff 기간동안 채널이 slot time에서 사용중이라면 backoff 간격이 감소되는 것은 정지되고 채널이 DIFS 시간간격과 한개의 slot time 시간간격동안 휴지상태라고 감지된 후에만 동작하게 되며 Backoff 시간간격이 0인 경우에 또 다시 패킷이 전송되기 시작한다. 이러한 backoff 기법은 채널이 사용중이라는 것을 인식하게 되므로 충돌 현상을 피할 수 있도록 하는 기법이다. 더욱이 채널의 캡처 현상을 피하기 위하여 AP 또는 단말은 채널이 DIFS 시간간격동안 휴지상태라고 해도 2개의 새로운 패킷이 연속적으로 전송되는 경우 backoff 시간동안 대기하게 된다. DCF의 backoff 메커니즘은 지수함수 특성을 갖고 있는데 각각의 패킷이 전송되는 경우 slot time 단위의 backoff 시간은 패킷전송 실패 횟수에 따라 정해지는 값을 n이라고 할 때 0~n-1의 범위에서 균

일하게 정해진다. 패킷이 처음으로 전송되는 경우 n은 최소 충돌 윈도우 값인 $CW_{min} = 16$ 으로 설정되고 패킷 전송이 실패할 경우 n 값은 $CW_{max} = 1024$ 의 범위내에서 2배로 증가한다. 그리고 패킷전송이 성공적으로 이루어진 경우 수신단말은 ACK 신호를 보내게 되며 프로토콜 헤더를 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_timeout 기간내에 ACK 신호를 수신하지 못하거나 채널에 다른 패킷이 전송되는 것을 감지하게 되면 패킷전송이 실패한 것으로 간주하며 backoff 메커니즘에 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. 모든 패킷은 duration 필드를 포함하며 NAV값은 각각의 패킷이 전송될 때 필드 값에 따라 업데이트 된다. 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.

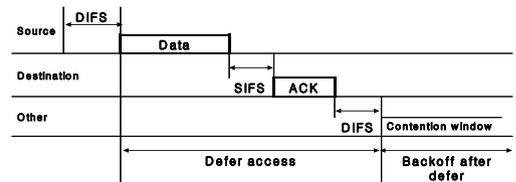


그림 3. 802.11a CSMA/CA 기반 DCF프로토콜의 동작

IV. Ricean 페이딩환경에서의 DCF의 처리를 시뮬레이션

4.1 OFDM 시스템의 BER 특성 산출

본 장에서는 순수 레일리 페이딩($\zeta = 0$) 및 복합 레일리/라이시안 페이딩($0 \leq \zeta \leq 10$) 채널 환경에서 채널코딩을 적용한 IEEE802.11a PHY의 성능을 분석한다.

4.1.1 BPSK/QPSK(6,12 Mbps)

데이터 속도 6 및 12Mbps 에서는 코드율 $r = 1/2$ 이 사용되며 코드율이 $r = k/n$ 인 길쌈부호가 적용될 때 비트오율의 상한은 다음과 같다[10].

$$P_b < \frac{1}{k} \sum_{d=d_{free}}^{\infty} B_d P_d \tag{10}$$

여기서 d_{free} 는 길쌈부호의 자유거리(free distance)를 말하고, B_d 는 가중치 d 경로상의 모드 정보비트의 총수를 나타내고, P_d 는 가중치 d 경로가 전송된 시퀀스로써 선택될 확률, 그리고 k 는 단위 클럭당 정보비트의 수를 말한다. B_d 및 d_{free} 는 길쌈 부호의 파라미터이며 P_d 는 변조방식, 채널, 판정방식에 따라 결정된다. 구축장 및 코드율이 주어지면, B_d 는 [11]에서 찾을 수 있다. 일반적으로 식(10)에서 지배적인 첫5번째 항까지만 고려하므로 식(10)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_b < \frac{1}{k} \sum_{d=d_{free}}^{d_{free}+4} B_d P_d \tag{11}$$

경관정에서는 해밍거리가 매트릭으로 사용된다. 모든 제로 경로가 송신되었다고 가정하자. d 가 홀수일 때, 수신된 시퀀스의 오류개수가 $(d+1)/2$ 보다 적다면 모든 제로 경로는 올바르게 선택 되어질 것이고, 그렇지 않다면 잘못된 경로가 선택되어 질 것이다. 따라서, d 가 홀수일 때 잘못된 경로가 선택될 확률은 다음과 같다[10].

$$P_d = \sum_{i=\frac{d+1}{2}}^d \binom{d}{i} p^i (1-p)^{d-i} \tag{12}$$

여기서 p 는 채널비트 오율이다. d 가 짝수 일 때, 오류개수가 $d/2$ 을 초과하면 그릇된 경로가 선택되어 지고, 만약 오류개수가 $d/2$ 과 같다면 두 경로의 매트릭은 동일하게 된다. 이런 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[10].

$$P_d = \sum_{i=\frac{d+1}{2}}^d \binom{d}{i} p^i (1-p)^{d-i} + \frac{1}{2} \binom{d}{d/2} p^{d/2} (1-p)^{d/2} \tag{13}$$

$\bar{\gamma}_b = \bar{E}_b/N_0$ 는 평균 수신 단위비트 에너지 당 잡음 전력밀도 이고 r 이 코드율 이라면 IEEE 802.11a 표준 OFDM AWGN 환경에서 BPSK/QPSK의 i^{th} 부 채널의 오율은 다음과 같다.

$$P_i = Q\left(\sqrt{2r\bar{\gamma}_{b_i}}\right) \tag{14}$$

여기서 $\bar{\gamma}_{b_i}$ 는 i^{th} 부 채널의 평균 수신 단위비트 에너지 당 잡음전력밀도 이기 때문에, 총량 p 는 각 N OFDM 부 채널의 평균 오율이 된다.

$$p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i \tag{15}$$

여기서 N 은 48또는 24개의 독립적인 부반송파라고 가정한다. 페이딩이 없다면 (i.e., $\bar{\gamma}_{b_i} = \bar{\gamma}_b$), $p_i = p$ 가 된다. 식(14)를 이용 식(12)또는 (13)에 적용하여 결과를 식(11)에 적용하면, AWGN환경에서 BPSK/QPSK의 성능을 얻을 수 있다. 채널코딩 적용한 경우와 적용하지 않은 경우엔 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\bar{\gamma}_{b_c} = r\bar{\gamma}_b \tag{16}$$

따라서 라이시안 페이딩 채널상에서의 BPSK/QPSK i^{th} 부 채널의 채널비트 오율은 다음과 같다.

$$p_i \approx \frac{1}{2\sqrt{\pi c_1}} \left(\frac{\zeta_i + 1}{r\bar{\gamma}_{b_i} + \zeta_i + 1} \right)^d \exp\left(\frac{-d\zeta_i r\bar{\gamma}_{b_i}}{r\bar{\gamma}_{b_i} + \zeta_i + 1} \right) \tag{17}$$

여기서, $c_1 = 1.2 + 0.1\zeta$ 는 실험적으로 얻어지며 $d = 1$ 이다. 페이딩이 없거나 또는 모든 부 반송파가 동일한 페이딩을 겪는다면($\zeta_i = \zeta$ 그리고 $\bar{\gamma}_{b_i} = \bar{\gamma}_b$ for all i), $p_i = p$ 가 된다. 식(17)를 이용 식(12)또는 (13)에 적용하여 결과를 식(11)에 적용하면, 라이시안 페이딩 채널환경에서 BPSK/QPSK의 성능을 얻을 수 있다.

4.1.2 16QAM (24 Mbps)

WLAN에서 24 Mbps의 data rates에 도달하기 위하여, IEEE 802.11a에서는 $r=1/2$ 의 convolutional

coding rate를 갖는 16QAM을 사용한다. BPSK와 QPSK의 실행에 있어서, 우리는 먼저 16QAM의 부반송 성능을 조사해야하고, 그때 완벽한 Rayleigh 페이딩과 Rayleigh과 Ricean 페이딩의 복합적인 환경하에서 16QAM으로 modulated된 OFDM의 해석을 수행한다. Ricean 페이딩 채널 환경에서 BPSK/QPSK 경우와 유사한 방식으로 접근하면, MQAM의 i 번째 sub-channel에서의 아래와 같은 근사된 채널 비트에러 확률을 얻을 수 있다.

$$P_i \approx \frac{4\left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) \cdot e^{-d \cdot \zeta_i \left[\frac{3qr\gamma_b}{3qr\gamma_b + 2(M-1)(\zeta_i + 1)}\right]}}{q\sqrt{2\pi c_2} \left[\frac{3qr\gamma_b + 2(M-1)(\zeta_i + 1)}{2(M-1)(\zeta_i + 1)}\right]^d} \quad (18)$$

$$\frac{2\left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right)^2 \cdot e^{-d \cdot \zeta_i \left[\frac{3qr\gamma_b}{3qr\gamma_b + 2(M-1)(\zeta_i + 1)}\right]}}{\pi c_2 q \left[\frac{3qr\gamma_b + (M-1)(\zeta_i + 1)}{(M-1)(\zeta_i + 1)}\right]}$$

여기서, $c_2 = 2.6 + 0.1\zeta$ 는 실험치 이고, ζ_i 는 i 번째 sub-channel에서 직접확산 신호 전력의 비이고, HDD상에서 $d=1$ 이다. 채널 페이딩이 없거나 모든 sub-channel에서 같은 페이딩에 존재한다면 $p_i = p$ 이다. 식 (12)과 식 (13)에서 $q \geq 4$ 일 때 식 (18)을 적용하면 식 (11)을 얻을 수 있고, Ricean 페이딩 채널 하에서 HDD의 square MQAM의 성능을 얻을 수 있다.

4.1.3 64QAM (54 Mbps)

code rate $r=3/4$ 이고 데이터 rate가 54Mbps인 상황에서 식 (18)에서 $q=6$ 인 것을 제외하면 16QAM과 같은 방식으로 생각할 때 Ricean 페이딩 채널

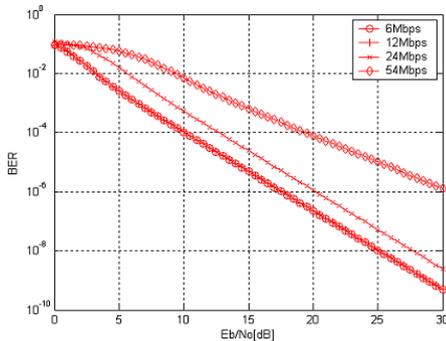


그림 4. Performance of OFDM over Ricean Fading

환경하에서 64QAM의 성능을 분석할 수 있다. 그림 4에서 6, 12, 24, 54Mbps에서 BPSK/QPSK, 16QAM, 64QAM 각각의 sub-channel 성능을 보여주고 있다. ($0 \leq \zeta \leq 10$)

4.2 BER 및 Eb/No에 따른 DCF의 처리율 산출

본 절에서는, 전송채널에서 발생하는 비트에러를 고려하는 포화 throughput의 분석적인 평가를 설명한다. 분석에서, 단말수 n 은 고정되었다고 가정하며 각각의 단말은 항상 전송 패킷을 가지고 있다고 가정한다. 다시 말해, 포화조건(saturation condition)상에서 동작한다(예를 들면 전송 큐는 항상 비어있지 않는다). 또한 패킷의 길이는 같고 채널상에서의 비트에러는 P_b 라는 확률로 랜덤하게 발생한다고 가정한다. 분석은 3개의 다른 부분으로 나누어 진다. 첫째, 백오프 확률상의 비트에러의 영향이 비트에러율 P_b 및 패킷사이즈 P 에 기초하여 유도된다. 둘째, 일반적인 슬롯타임 안에서 단말의 패킷 전송 확률 τ 가 분석된다. 이 확률은 사용된 접속 메커니즘에는 직접적으로 의존하지 않지만, 패킷 에러율 P_e 및 충돌 확률에 관련된다. 그리고, 일반적인 슬롯타임 내에서의 이벤트 발생의 연구를 통해, 기본접속 방법을 통한 throughput이 계산된 τ 및 P_b 의 함수에 의해 표현된다.

4.2.1 패킷 에러율

기본접속 방법에서, PHR헤더 및 MAC헤더를 포함한 데이터 패킷은 패킷내부의 어느 한 비트라도 에러가 발생하면 재 전송되어야 한다. 편의상, 변수 P_c 를 선언하고 패킷안의 에러 때문에 백 오프가 발생될 확률을 나타내자. 패킷안의 에러는 랜덤하게 발생한다고 가정한다. 기본접속 메커니즘에서, 다음과 같이 표현 가능하다.

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

4.2.2 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 백 오프 타임 카운터는 각 슬롯타임의 시작에서 감소된다. 각 단말에서의 백 오프 카운터의 값은 또한 그것의 전송 히스토리(예를 들어, 얼마나 많은 재전송이 이

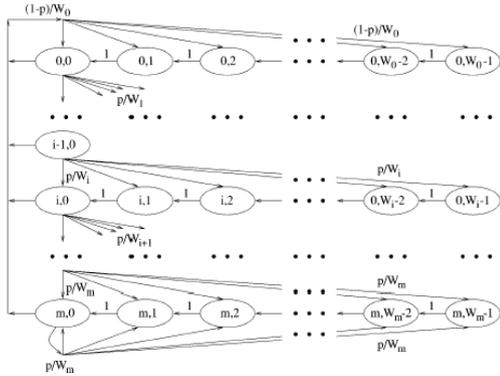


그림 5. 백오프 윈도우 사이즈 마르코프 연쇄 모델

전 패킷에서 발생했는지 여부에 의존하므로, 확률 과정 $b(t)$ 는 비 마르코프 확률과정이다. 편의상 $W = CW_{\min}$ 이라 정의하자. m 을 최대 백 오프 단계라 하면, $CW_{\max} = 2^m W$ 가 된다. 또한 $W_i = 2^i W$ 라 정의한다. 여기서 $i \in (0, m)$ 는 백 오프 단계라 한다. 그리고 $s(t)$ 는 시간 t 에서의 백 오프 단계 $(0, \dots, m)$ 의 확률과정을 나타낸다.

모델에서 전송된 패킷이 충돌하거나 성공적으로 전송되지 못할 확률 p 는 단말의 상태와는 무관하다고 가정한다. 이런 경우, 편의상 bi-dimensional 과정은 이산시간 마르코프 연쇄가 되며, 그림 5에 나타내었고 오로지 비공백의 한단계 천이 확률은 다음과 같다.

$$\begin{cases} P\{i, k | i, k + 1\} = 1, & k \in (0, W_i - 2); \quad i \in (0, m) \\ P\{0, k | i, 0\} = (1 - p) / W_0, & k \in (0, W_0 - 1); \quad i \in (0, m) \\ P\{i, k | i - 1, 0\} = p / W_i, & k \in (0, W_i - 1); \quad i \in (1, m) \\ P\{m, k | m, 0\} = p / W_m, & k \in (0, W_m - 1); \end{cases} \quad (20)$$

식(20)에서, 첫 식은 백 오프 타임은 각 슬롯 타임의 시작에서 감소 된다는 사실을 설명한다. 두번째 식은 성공적인 패킷 전달 다음의 새로운 패킷은 백 오프 단계 0을 가지고 전송이 시작 됨을 설명하고, 따라서 백 오프의 시작은 구간 $(0, W_0 - 1)$ 에서 균일하게 선택된다. 나머지 두 개의 식은 성공하지 못한 전송 뒤의 시스템 모델을 나타내며, 특별히 백 오프 단계 $i - 1$ 에서 전송 실패가 발생되면, 백 오프 단계는 증가되고, 새로운 초기 백 오프 값은 구간 $(0, W_i)$ 에서 균일하게 선택된다. 결국, 네 번째 식은 일단 백 오프 단계가 m 에 다다르면, 뒤 따르는 패킷 전송을 증가시키지 않음을 모델링하고 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 연쇄의 정적 분포라고 할 때, 연쇄의 규칙에 따라, 다음의 관계가 성립한다.

$$b_{i,k} = \begin{cases} p^i b_{0,0}, & k = 0; \quad i \in (0, m - 1) \\ \frac{p^m}{1 - p} b_{0,0} & k = 0; \quad i = m \\ \frac{W_i - k}{W_i} b_{i,0} & k \in (0, W_i - 1); \quad i \in (0, m) \end{cases} \quad (21)$$

$b_{0,0}$ 의 값은 정규 조건을 적용하여 결정된다.

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{W_i-1} b_{i,k} &= \sum_{i=0}^m b_{i,0} \sum_{k=0}^{W_i-1} \frac{W_i - k}{W_i} = \sum_{i=0}^m b_{i,0} \frac{W_i + 1}{2} \\ &= \frac{b_{0,0}}{2} \left[W \left(\sum_{i=0}^{m-1} (2p)^i + \frac{(2p)^m}{1 - p} \right) + \sum_{i=0}^{m-1} (p)^i + \frac{(p)^m}{1 - p} \right] \\ &= 1 \end{aligned} \quad (22)$$

이것으로부터, 다음을 얻을 수 있다.

$$b_{0,0} = \frac{2(1 - 2p)(1 - p)}{(1 - 2p)(W + 1) + pW(1 - (2p)^m)} \quad (23)$$

이제 확률 τ 는 단말이 랜덤하게 선택한 슬롯타임에서 표현되게 할 수 있다. 백 오프 단계에 상관없이 백 오프 타이머가 0일 때면 어떤 전송도 발생할 수 있으므로, 다음식을 얻을 수 있다.

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{i,0} = \frac{b_{0,0}}{1 - p} = \frac{2(1 - 2p)}{(1 - 2p)(W + 1) + pW(1 - (2p)^m)} \quad (24)$$

그러나, 일반적으로, τ 는 성공하지 못할 확률 p (아직은 미지수)에 조건적으로 의존하므로, p 값을 찾기 위해서 전송된 패킷이 충돌될 확률 p 를 알아야 할 필요가 생기며, 이는 적어도 $n-1$ 개의 나머지 단말들이 타임슬롯에서 전송을 함을 의미한다. 이 문제를 간단히 하기 위해서, 각 전송은 동일한 상태에서 시스템을 본다고 가정한다. 정상상태에서, 각 나머지 단말은 τ 확률을 가지고 패킷을 전송한다. 패킷 에러율 P_e 의 영향을 고려하면, 다음을 얻을 수 있다.

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1} (1 - P_e) \quad (25)$$

식(7)을 역변환하여, $\tau^*(p) = 1 - \left(\frac{1-p}{1-P_c}\right)^{\frac{1}{n-1}}$ 을 얻을 수 있다. 식(6) 및 (7)은 미지의 두 변수 τ, p 의 비선형 시스템을 나타내며, 이는 산술적 기법에 의해 풀 수 있고 이 시스템은 유일해를 가지며 분명하다.

4.2.3 포화 throughput

S 를 채널이 페이로드 비트들을 성공적으로 전송하기 위해 사용한 시간의 비율로 정의된 정규화된 시스템 throughput이라 하자. S 를 계산하기 위해서, 랜덤하게 선택된 슬롯타임에서 무슨일이 발생하는지 분석해 보자. P_{tr} 을 슬롯타임에서 적어도 하나의 전송이 발생될 확률이라 하자. 채널상에서 n 단말이 경합을 벌이고, 각 전송은 τ 확률을 가지므로 다음을 얻을 수 있다.

$$P_s = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}(1-P_c)}{P_{tr}} = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}(1-P_c)}{1-(1-\tau)^n} \quad (26)$$

이제 S 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S = \frac{E[\text{payload information transmitted in a slot time}]}{E[\text{length of a slot time}]}$$

슬롯타임 내에서 페이로드 정보가 성공적으로 전송될 평균량은 $P_{tr}P_sP$ 이다. 왜냐하면 슬롯타임에서 성공적인 전송이 일어날 확률이 $P_{tr}P_s$ 이기 때문이다. 평균 슬롯타임의 길이는 채널이 빌 확률, $1 - P_{tr}$, 전송성공확률, $P_{tr}P_s$, 충돌 확률, $P_{tr}(1 - P_s)$, 을 고려하면 쉽게 구할 수 있다. 그러므로

$$S = \frac{P_s P_{tr} P}{(1 - P_{tr})\sigma + P_{tr}P_sT_s + P_{tr}(1 - P_s)T_c} \quad (27)$$

(27)은 재조정 하면 다음과 같다.

$$S = \frac{P}{T_s - T_c + \frac{\sigma(1 - P_{tr})/P_{tr} + T_c}{P_s}} \quad (28)$$

여기서, T_s 는 성공적인 전송으로 채널이 busy로 감지되는 평균시간이며, T_c 는 충돌동안에 각 단말이 채널을 busy로 감지할 평균시간을 나타낸다. σ 는

빈 슬롯타임 지속시간을 나타낸다. 기본 접속의 경우에 다음을 얻을 수 있다.

$$\begin{cases} T_s = DIFS + T_p + T_{PHY} + \frac{MAC_h + P}{Rate} + SIFS + T_{ACK} \\ T_c = DIFS + T_p + T_{PHY} + \frac{MAC_h + P}{Rate} + EIFS \end{cases} \quad (29)$$

4.3 Eb/No 및 BER 처리를 시뮬레이션 결과 및 검토

수치결과를 얻기 위해 사용된 시스템 파라미터는 표 1에서 정리하였다.

표 1. 시스템 시뮬레이션 파라미터

Packet payload: P	60,576,1500[byte]
MAC_h	34 [byte]
PHY_h	5[byte]
ACK	112its+ PHY_h
Number of stations: n	5,20,50
Rate	6,12,24,54Mbps
T_{ACK}	44,32,28,24 μ s for 6,12,24,54Mbps
Propagation delay	1 μ s
T_p	16 μ s
T_{PHY}	4 μ s
Slot time	9 μ s
SIFS	16 μ s
DIFS	34 μ s
EIFS	43 μ s

그림 6은 전송확률 τ 에 따른 Throughput 변화를 나타내는데, 802.11a MAC 헤더는 34 바이트로 하고 802.11a의 전송속도는 54 Mbps, 24 Mbps, 12 Mbps, 6 Mbps로 한다. 패킷 크기는 일반적으로 TCP ACK 데이터의 경우 60 바이트, Web Browsing 데이터인 경우 576 바이트, 인터넷의 최대 데이터 크기는 1500 바이트 정도 이므로 (그림 6)에서는 802.11a MAC 헤더는 34 바이트로 하고 802.11a의 전송속도는 6 Mbp로 하여 MSDU의 패킷크기는 60 바이트일 때 단말수 5,20,50에 대한 전송확률에 따른 처리율을 보여준다.

표 2는 그림 8에서 단말수 n 에 따른 최대 Throughput과 그 때의 τ 값을 나타내었다.

그림 7은 단말수 $n=5$ 이고 패킷 사이즈 $P=60$ byte 일 때 전송속도는 54 Mbps, 24 Mbps, 12 Mbps, 6 Mbps일 때 각각의 BER에 따른 throughput 성능을 나타낸다.

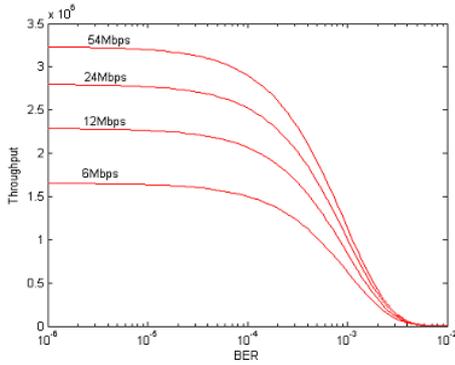


그림 6. Throughput vs. 전송확률 τ

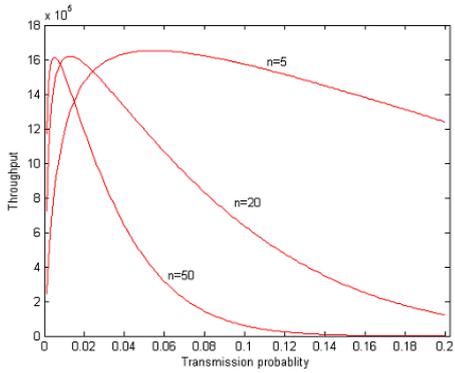


표 2. 그림 6에서 n에 따른 최대 Throughput과 그 때의 τ 값

n	Max Throughput(6Mbps)
5	1.6525e+006 ($\tau=0.054$)
20	1.6195e+006 ($\tau=0.013$)
50	1.6133e+006 ($\tau=0.005$)

그림 8은 단말수 $n=5$ 이고 패킷 사이즈 $P=60$ byte 이고, 전송속도는 6 Mbps, 일 때 패킷 사이즈 P 를 60,576,1500[Byte]로 증가 시킬때 각각의 BER에 따른 throughput 성능을 나타낸다

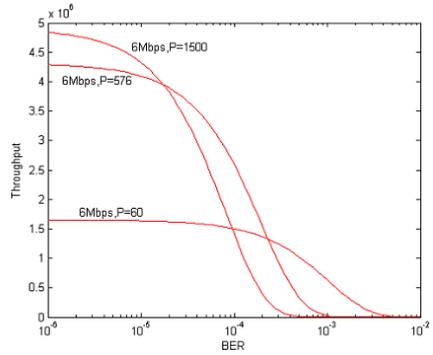


그림 8. 패킷 사이즈에 따른 BER vs. throughput

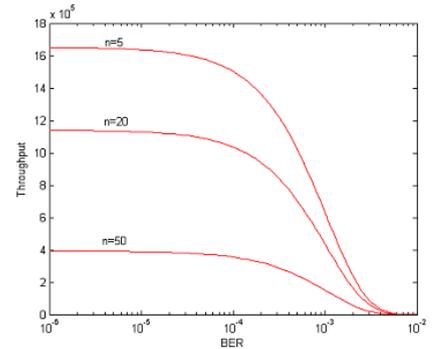


그림 9. 단말수에 따른 BER vs. throughput

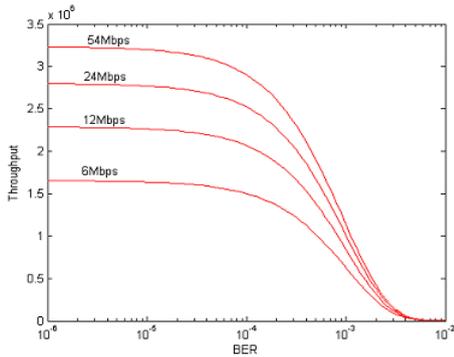


그림 7. BER vs. throughput

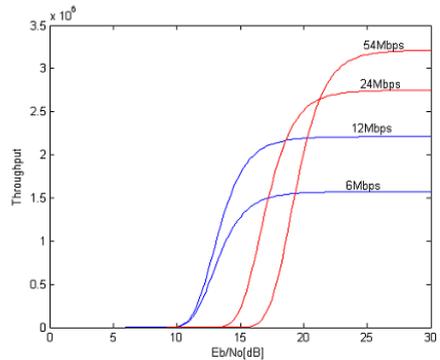


그림 10. Eb/No vs. throughput

그림 9는 패킷 사이즈 $P=60$ byte이고, 전송속도는 6 Mbps일 때 단말수 n 을 5,20,50개로 증가 시킬 때 각각의 BER에 따른 throughput 성능을 나타낸다.

그림 10은 단말수 $n=5$ 이고 패킷 사이즈 $P=60$ byte 일 때 전송속도는 54 Mbps, 24 Mbps, 12 Mbps, 6 Mbps일 때 각각의 Eb/No에 따른 throughput 성능을 나타낸다.

그림 11은 단말수 $n=5$ 이고 패킷 사이즈 $P=60$ byte이고, 전송속도는 6 Mbps, 일 때 패킷 사이즈

P 를 60,576,1500[Byte]로 증가 시킬때 각각의 E_b/N_0 에 따른 throughput 성능을 나타낸다.

그림 12는 패킷 사이즈 $P=60$ byte이고, 전송속도는 6 Mbps,일 때 단말수 n 을 5,20,50개로 증가 시킬 때 각각의 E_b/N_0 에 따른 throughput 성능을 나타낸다.

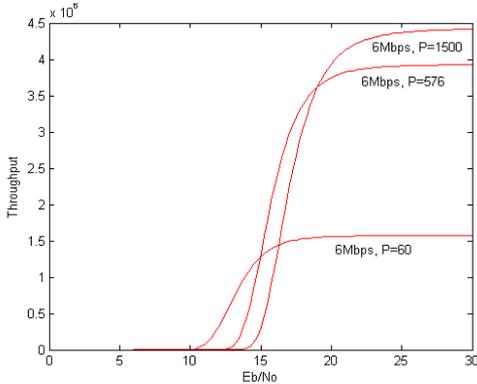


그림 11. 패킷 사이즈에 따른 E_b/N_0 vs. throughput

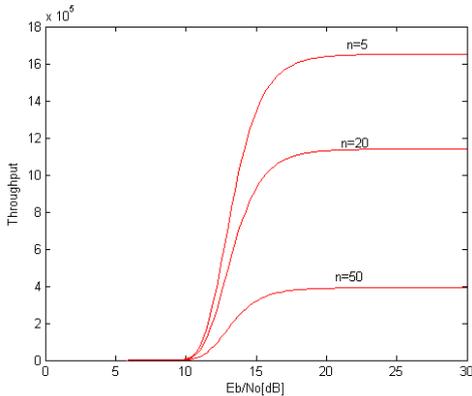


그림 12. 단말수에 따른 E_b/N vs. throughput

V. 결론

본 논문에서는 IEEE 802.11a 무선 LAN의 MAC(Medium Access Control) 계층에서 DCF(Distributed Coordination Function) 프로토콜의 처리율을 트래픽 량 및 MSDU(MAC SDU) 크기 측면에서 분석하였다. 802.11a에서 MSDU의 패킷 크기와 패킷 발생율에 따른 처리율 분석에 802.11a MAC 헤더는 34 바이트로 가정하였고 802.11a의 전송속도는 54 Mbps, 24 Mbps, 12 Mbps, 6 Mbps로 하였다. 전송속도가 클수록 많은 양의 데이터를 전송할 수는 있으나 오히려 처리율은 감소하며 MSDU

의 크기를 크게 할수록 처리율은 증가한다는 것을 알 수 있었으며 MSDU의 크기를 일정하게 할 때 처리율이 최대가 되는 최적 트래픽 양도 구해질 수 있음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 구내 및 공중 무선 LAN 설계와 구축 업무에 활용될 수 있겠으나 무선채널의 환경을 고려하지 않은 것이고 실제의 무선 LAN 채널환경을 고려하여 E_b/N_0 및 BER에 따른 처리율 특성을 파악하여야 한다. 그리고 에러율을 감소시키기 위한 에러제어기법의 적용, 기존의 DCF 성능을 개선하기 위한 EDCF(Enhanced DCF) 및 HCF(Hybrid Coordination Function)도 고려해야 될 것으로 사료되며 이는 향후의 연구방향이기도 하다.

참고 문헌

- [1] IEEE 802.11b, "Part 11: Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specification," 1997.
- [2] 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.
- [3] Upkar Varshney, "The Status and Future of 802.11-based WLANs," IEEE Computer, pp. 102-105, June 2003.
- [4] 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.
- [5] Jangeun Jun, Pushkin Peddabachagari and Mihail Sichertiu, "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
- [6] 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.
- [7] Juha Heiskala and John Terry, "OFDM Wireless LANs : A Theoretical and Practical Guide," Sams Publishing, 2002.
- [8] Jim Geier, "Wireless LANs," Sams Publi-

shing, 2002

- [9] M. V. Clark, K. K. Leung, B. McNair and Z. Kostic, "Outdoor 802.11 Cellular Networks: Radio Link Performance," Proc. IEEE ICC, pp. 512 - 516, 2002.
- [10] Proakis, J.G., *Digital Communications*, 4th ed., McGraw Hill, New York, NY, 2001.
- [11] Clark, G.C., Jr. & Cain, J.B., *Error-Correction Coding for Digital Communications*, Plenum Press, New York, NY, 1981.

하 은 실 (Eun-Sil Ha)

정회원



1987년~1995년 대우통신 연구소 TDX 연구실
 2003년~현재 유한보건의료복지 연구소 의료정보시스템 팀장
 2005년 성균관대학교 대학원 졸업(공학박사)

<관심분야> 무선 데이터통신, ATM통신, 무선 인터넷 프로그래밍, 통신 프로토콜

정 진 옥 (Jin-Wook Jung)

중신회원



1966년 3월~1974년 2월 성균관대학교 전기공학과 졸업(공학사)

1977년 3월~1979년 2월 성균관대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

1984년 3월~1991년 2월 서울대학교 대학원 계산통계학과 졸업(이학박사)

현재 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 교수

이 하 철 (Ha-Chul Lee)

정회원



1983년 2월 한국항공대학 항공통신공학과(공학사)

1990년 8월 한국항공대학 항공통신정보공학과(공학석사)

1999년 8월 한국항공대학교 항공통신정보공학과(공학박사)

1995년 9월 현재 유한대학 정보

통신과 부교수
 <관심분야> 무선 데이터통신, ATM통신, 트래픽이론, 통신 프로토콜