

Rayleigh 페이딩, 차폐현상 및 Near-far 현상을 고려한 무선 채널에서의 무선 LAN용 매체접근제어 프로토콜 성능비교

正會員 김 재 현*, 신 형 철**, 이 정 규***

Performance Comparison of Wireless MAC Protocols for Wireless LANs in the Radio Channel with Rayleigh Fading, Shadowing and Near-far Effects

Jae Hyun Kim*, Hyung Chul Shin**, Jong Kyu Lee*** *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 레일리 페이딩, log-normal 차폐현상 및 Near-far 영향을 고려한 무선 매체접근제어 프로토콜의 성능을 분석한다. 무선 매체접근제어 프로토콜로서 무선 근거리 통신망의 국제 표준화 기구인 IEEE 802. 11 프로토콜인 CSMA/CA 프로토콜을 대상으로 채널 처리율과 패킷지연을 분석한다. 분석결과로서 채널상의 부하가 적을 때는 에러가 없는 모델에 비하여 무선 환경에서 50%의 성능이 저하되는 것을 알 수 있었으며, 망의 부하가 클 때, 4-Way Handshake CSMA/CA 방식이 다른 두 CSMA/CA 방식에 비하여 우수한 성능을 보이는 것을 알 수 있었다.

ABSTRACT

The channel throughput and packet delay of wireless media access control (MAC) protocols with Rayleigh fading, log-normal shadowing and near-far effects are analyzed. We consider CSMA/CA protocols as the wireless MAC protocols, since CSMA/CA protocols are based on the standard for wireless Local Area Networks (LANs) IEEE 802. 11. We have found that the performance of CSMA/CA in radio channel model is reduced above 50% than those of error free channel model in low traffic load. We also found that 4-Way Handshake CSMA/CA

*UCLA 전기공학과

**한양대학교 전자계산학과

***한양대학교 전자계산학과 교수

論文番號:97064-0221

接受日字:1997年 2月 21日

protocol is superior to the other CSMA/CA protocols in high traffic load.

I. 서론

발전하는 통신 기술의 추세를 볼 때, 가장 큰 흐름은 광통신 망을 근간으로 하는 초고속통신망에 대한 기술 발전과 단말기들의 이동성을 고려하는 무선 통신망 기술의 발전이라고 할 수 있을 것이다. 이 중 무선 통신망에 대한 기술 발전은 다시 음성에 대한 서비스에 중점을 두고 있는 PCS (Personal Communication Service)와 데이터 전송에 중점을 두고 있는 무선 데이터 통신망의 기술 등을 들 수 있을 것이다. 본 논문에서는 이러한 무선 데이터 통신망 기술 중 현재 국제적으로 많은 관심을 보이고 있는 무선 근거리 통신망에 대하여 기술하고자 한다. 각 기업체에서 개발한 무선 근거리 통신망 시스템에서는 기업체 고유의 프로토콜을 사용하여, 제조회사가 다른 경우 무선 근거리 통신망 시스템간의 호환이 이루어지지 않고 있는 실정이다[1]. 이러한 점을 고려하여 1990년에 IEEE 802.11 위원회가 발족되어 무선 근거리 통신망의 표준 프로토콜을 설정하기 위하여 연구 중에 있다[2]. 또한, 유럽의 경우에도 마찬가지로 ETSI에서 HIPERLAN (HIGH PERFORMANCE Radio Local Area Networks)이라 하여 5 GHz 또는 17 GHz 대역을 사용하며 전송속도가 최고 23.5 Mbps의 고속 무선 근거리 통신망의 연구가 활발하게 진행되고 있다[3].

무선환경에서의 매체접근제어 프로토콜 성능분석에 대한 연구들은 이미 활발히 이루어지고 있다[4, 5]. 그러나, 이러한 논문들은 대부분 ALOHA 프로토콜에 관련된 것들이다. 근래에는 CSMA/CA 프로토콜에 관련된 여러 논문들이 발표되고 있다[6, 7]. 그러나, 대부분의 논문들에서 CSMA/CA 프로토콜의 특성을 단순화하여 대략적인 성능을 분석하고 있다. 본 논문에서는 IEEE 802.11 국제 표준화 프로토콜인 CSMA/CA 방식을 Rayleigh fading 및 shadowing 과 거리에 따른 near-far 영향을 고려하여 처리율 및 패킷지연을 관점에서 성능을 분석한다.

논문의 구성은 II장에서 무선채널의 전파특성에 대하여 기술하며, III장에서는 CSMA/CA 프로토콜 시스템 모델을 설정하고, IV장에서 세가지 CSMA/CA

프로토콜의 처리율을 분석하며, V장에서는 패킷지연을 분석한다. 또한, VI장에서는 수학적분석의 결과를 다양하게 보이고, 시뮬레이션을 통하여 분석결과를 검증한다. 마지막으로, VII장에서는 결론에 대하여 언급하였다.

II. 무선채널 전파특성

본 논문에서는 Linnaritz의 무선 채널 모델을 이용하여 다중경로페이딩 (multipath fading), 차폐현상 (shadowing) 및 거리에 의한 감쇠(near-far effect) 특성을 고려하여 CSMA/CA 프로토콜의 성능을 분석하며, 각 신호의 감쇠는 동일한 모델로 가정하였다[8]. 위에서 언급한 multipath, shadow fading 및 거리에 대한 near-far effect 특성을 고려하여 임의의 터미널에서 수신된 테스트 신호 전력인 w_0 를 구하면 다음의 식 (1)과 같으며, 도식적으로 보면 그림 1과 같다.

$$f_w(w_0) = \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{1}{w_0} \exp\left(-\frac{w_0}{w_L}\right) \frac{f(r_i)}{\sqrt{2\sigma_s w_L}} \cdot \exp\left\{-\frac{\ln^2(r_i^2 w_0)}{2\sigma_s}\right\} dr dw_L \quad (1)$$

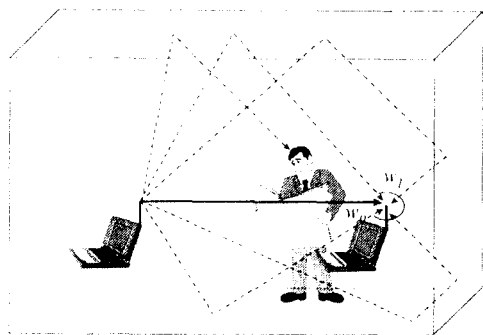


그림 1. 페이딩 신호 캡처모델
Fig. 1 Fading signal capture model

여기서, w_L 은 지역 평균 수신 전력(local mean power)을 의미하며, $f(r_i)$ 는 거리분포의 확률밀도함수를 의미하는 것으로, 본 논문에서는 각 터미널들이 균등하

게 분포한다고 가정하였다. 따라서, 전파의 거리에 따른 확률밀도함수는 $f(r_i) = 2r_i$, $r_i \in (0, 1)$ 이다[9]. 그리고, ξ 는 path loss 파라미터로서 건물의 구조에 따라 1.79에서 6.2 사이의 값을 갖는다. 본 논문에서는 대부분의 다른 연구들에서 일반적으로 사용하는 ξ 값이 4일 때에 대하여 고려한다[8, 9]. 차폐감쇠는 구역 평균 수신전력 log-normal분포된 테스트 신호의 지역 평균 수신전력으로 표현되어지며, 이때 표준편차는 σ_s 로 정의한다. 여러 간섭신호들중 테스트 신호의 전력이 일정값이상 커서 테스트 신호가 올바르게 수신되는 현상을 캡처현상 (capture effect)라 하며, 이때의 threshold 수신 전력을 캡처 ratio (capture ratio: z)라고 한다[8]. 본 논문에서는 Rayleigh 페이딩을 해석하기 위하여 weight 함수 접근방법을 사용한다. 간섭 신호 전력에 대한 one side Laplace image를 $\phi_{w_0}(\cdot)$ 라고 정의하면

$$\phi_{w_0}(s) \triangleq \int_0^{\infty} \exp(-sx) f_{w_0}(x) dx \quad (2)$$

이다. 테스트 신호의 수신전력이 w_0 이고 지역평균 수신전력이 w_L 일 때 캡처확률 $q(w_0, z)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$q(w_0|z) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{f(r)}{\sqrt{2\sigma_s w_L}} \exp\left\{-\frac{\ln^2(r^2 w_L)}{\sqrt{2\sigma_s}}\right\} \cdot \left\{ \phi_w\left(\frac{z}{w_L}\right) \right\} dr dw_L \quad (3)$$

이때, Laplace image $\Phi(\cdot)$ 항은 거리에 따른 감쇠, 차폐현상에 의한 감쇠 및 다중경로의 감쇠에 의한 수신신호로서, 다음과 같은 결합확률밀도함수(joint probability density function)로 표현된다.

$$\phi_w(s) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{1}{1+sw_L} \frac{f(r)}{\sqrt{2\sigma_s w_L}} \cdot \exp\left\{-\frac{\ln^2(r^2 w_L)}{\sqrt{2\sigma_s}}\right\} dr dw_L \quad (4)$$

송신터미널들의 거리가 수신기를 중심으로 선형적으로 퍼져있다고 가정하고, ξ 를 4로 가정하여 캡처확률을 구해보면 다음 식 (5)와 같다.

$$q(w_0|z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^1 \int_{-\infty}^{\infty} r \exp(-x^2) \quad (5)$$

$$\cdot \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp(-y^2) dy \right] dx dr$$

여기서,

$$f(x, y) \triangleq \left[\sqrt{z} r^2 \exp\left\{\frac{\sqrt{2}}{2} \sigma_s (y-x)\right\} \right] \cdot \arctan \left[\frac{1}{z r^4} \exp\left\{\frac{\sqrt{2}}{2} \sigma_s (x-y)\right\} \right] \quad (6)$$

식 (6)을 구하기 위해서는 적분음함의 공식으로 근사화하는 Hermite polynomial 방법을 사용하여 근사화한다[10]. 식 (6)을 이용하여 거리에 따른 감쇠, 차폐에 의한 감쇠 및 다중경로에 의한 감쇠에 의한 수신신호에서 원하는 신호가 캡처될 확률 $q(w_0|z)$ 를 구한다.

III. CSMA/CA 프로토콜 모델

IEEE 802.11 프로토콜에서 기본적으로 서비스를 비동기 서비스와 시간제약 서비스로 나누어 서비스하고 있다. 비동기 서비스는 Distributed Coordination Function (DCF)에 의해 수행되고, 시간제약 서비스는 Point Coordination Function (PCF)에 의하여 수행된다. 본 논문에서는 이중 DCF에 국한되어 성능을 분석하기로 한다.

패킷 전송방식의 예로서, 기본적으로 데이터만을 보내는 Basic CSMA/CA 프로토콜, 데이터와 positive acknowledgment (ACK) 패킷을 전송하는 Stop-and-Wait Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (SW CSMA/CA) 프로토콜 및 Request To Send (RTS) 패킷을 보내고, Clear To Send (CTS) 패킷을 받은 후 데이터를 보내고, ACK 패킷을 받는 4-Way Handshake CSMA/CA (4-WH CSMA/CA) 프로토콜 등이 있다. 이 때, ACK 패킷 전송을 사용하지 않는 Basic CSMA/CA 프로토콜의 경우에는 일반적으로 멀티캐스트나 브로드캐스트 전송시 사용된다. 여기서, 세가지 전송 방식의 이름은 표준안에서는 정의하고 있지 않으며, 본 논문에서만 각 명칭을 정의한 것이다.

성능분석 모델로서 slotted CSMA/CA 모델을 사용하였으며, CSMA/CA 프로토콜은 IEEE 802.11의 DCF 방식과 동일하게 설정하였다. 기본적인 CSMA/CA 프로토콜은 1-persistent CSMA 방식과 p-persistent

CSMA 방식의 혼합된 형태의 프로토콜로 모델링하고, DIFS 및 SIFS 지연을 고려하였다. p -persistent CSMA 방식을 적용한 이유는 backoff 알고리즘은 1-persistent CSMA 방식으로는 분석을 할 수 없기 때문이다. 또한, 시간축은 슬롯 크기인 a 로 나누어 있다고 가정하였다. 트래픽 모델은 유한 가입자 모델로 설정하여 M 개의 터미널로 구성된 통신망으로 설정하였고, 한 터미널에서 새로운 패킷이 발생할 확률은 geometric 분포를 따르는 g 라고 가정한다. 그리고, CSMA/CA 프로토콜의 경우, 한 터미널은 확률 p 로 버퍼 내의 패킷에 대하여 한 슬롯 동안 전송을 시도하며, 각 터미널의 같은 거리에서의 전파지연은 모두 동일하다고 가정하였다. 또한, 패킷의 전송시간은 1로 고정되었다고 가정하고 기본 단위시간으로 설정하였다. 이러한 가정들에 의하여 시스템의 상태는 다음의 세 가지 중의 하나의 상태에 있게 된다. 우선 I 는 idle 상태로 패킷전송을 준비한 터미널이 하나도 없는 상태이며, B 는 busy 상태로 1개 이상의 터미널이 패킷전송을 하는 상태이며, U 는 useful transmission 상태로서, 실제 전송에 성공하는 상태이다. 본 논문에서는 각 프로토콜의 성능을 처리율 및 패킷지연의 관점에서 분석하였다. 분석 방법은 renewal theory에 기본을 두고, busy 기간 분석 방법을 이용하여 처리율 및 패킷지연을 계산하였다.

IV. 처리율분석

1. Basic CSMA/CA

Basic CSMA/CA 프로토콜의 처리율을 분석하기 위하여 평균 I 기간, 평균 B 기간 및 평균 U 기간을 구하고 $U/(I+B)$ 로 처리율을 유도한다. Busy 기간은 다시 sub-busy 기간으로 나누어지며, j 번째 sub-busy 기간을 $B^{(j)}$ 로 정의하며, 이것은 다시 전송지연기간인 $D^{(j)}$ 와 전송시간으로 $T^{(j)}$ 로 구성된다. Busy 기간은 sub-busy 기간 $B^{(j)}$ 의 모임으로 구성되어 있고, $j \geq 2$ 일 때의 sub-busy 기간은 DIFS의 기간 f , 전송지연 $D^{(j)}$ 및 전송기간인 $T^{(j)}$ 로 구성되어 있다. 또한, 세가지 CSMA/CA 프로토콜 분석과정의 이해를 돕기 위하여 패킷 전송기간과 DIFS지연의 합을 $TP(1+a+f)$ 라고 정의한다. 각 busy 기간내의 sub-busy 기간의 수를 J 라고 정의하면 B 와 U 는 각 sub-busy들의 합으로

쉽게 구할 수 있다. 이때, sub-busy 기간은 바로 이전의 sub-busy 기간 내에 패킷이 발생하게 되면 지속적으로 연속되기 때문에 평균 J 는 다음과 같다.

$$\text{Prob} \{J=j\} = [1 - (1-g)^{TP(1+a)M}]^{j-1} \cdot (1-g)^{TP(1+a)M} \quad (7)$$

$B^{(1)}$ 는 처음 idle 기간에서 busy 기간으로 전이할 때 발생하며, $B^{(j)}$ ($j \geq 2$)는 이전의 sub-busy 기간에 의하여 발생하고, 각각이 서로 geometric 분포의 독립적인 특성을 갖는다. U 의 특성도 B 와 동일하며 각각의 평균은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{B} &= E[B^{(1)}] + (\bar{J} - 1)E[B^{(2)}] \quad (8) \\ \bar{U} &= E[U^{(1)}] + (\bar{J} - 1)E[U^{(2)}] \end{aligned}$$

다음으로 평균 idle 기간을 구해보자. idle 기간은 각 slot에서 패킷이 발생하지 않는 경우로 geometric 분포를 따르므로,

$$\text{Prob}\{I=ka\} = (1-g)^{Mk-1} \cdot [1 - (1-g)^M] \quad (9)$$

$$I = \frac{a}{[1 - (1-g)^M]} \quad ; k = 1, 2, \dots$$

이 된다. 여기서, $N_0^{(j)} = n$ 이고, $j \geq 2$ 일 때의 $D^{(j)}$ 분포를 구하면 다음과 같다.

$$\text{Prob} \{D^{(j)} \geq ka | N_0^{(j)} = n\} = (1-p)^{kn} (1-g)^{kM} \quad (10)$$

식 (10)에서 k 와 n 의 모든 경우에 대하여 고려하여 $D^{(j)}$ 를 구하면

$$E[D^{(j)}] = \begin{cases} a[1 - (1-g)^M] & ; j=1 \\ \frac{a}{1 - (1-g)^{TP(1+a)M}} \left(\sum_{k=1}^{\infty} \{(1-p)^k (1-g)^{kM}\} \right) & ; j=2, 3, \dots \end{cases} \quad (11)$$

이고, 식 (8), (9) 및 (11)을 이용하면 평균 idle 기간과

평균 busy 기간의 합을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \overline{B} + \overline{I} \\ & \rightarrow f [1 - (1-g)^M] + 1 + \bar{a} \\ & \rightarrow \frac{1}{(1-g)^{(TP_s/a)M}} \left((f+1+a)[1 - (1-g)^{(TP_s/a)M}] \right. \\ & \quad + a \sum_{k=1}^M \{ (1-p)^k - (1-g)^{(TP_s/a)k} \} \left. + \frac{a}{1 - (1-g)^M} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

다음으로 평균 $U^{(j)}$ 를 구한다. $N_0^{(j)} = n$ 이고, $D^{(j)} \geq ka$ 일 때, 패킷전송이 성공할 때의 평균 기간은 다음의 두가지 경우중 하나이다. 첫번째는 대기중인 n 개중 하나의 터미널이 패킷을 확률 p 로 전송을 하거나, 두번째로 패킷이 준비되지 않은 $(M-n)$ 개의 터미널중 하나의 터미널이 확률 g 로 새로운 패킷을 전송하는 경우이다.

$$\begin{aligned} & E [U^{(j)} | D^{(j)} \geq ka, N_0^{(j)} = n] \\ & = \begin{cases} np(1-p)^{n-1}q(w_0|z) & ; k=0 \\ [np(1-p)^{n-1}(1-g)^{(M-n)} \\ + (1-p)^n(M-n)g(1-g)^{(M-n-1)}]q(w_0|z) & ; k>0 \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)에서 k 와 n 에 대한 모든 경우를 고려하여, 조건부 평균값 계산을 이용하여 정리하면, 다음의 식 (14)와 같다.

$$\begin{aligned} & E[U^{(j)}] = \\ & \begin{cases} \frac{Mg(1-g)^{M-1}}{1 - (1-g)^M} q(w_0|z) & ; j=1 \\ \frac{q(w_0|z)}{1 - (1-g)^{(TP_s/a)M}} \sum_{n=1}^M \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} [np(1-p)^{(k+1)n-1} \right. \\ \cdot (1-g)^{(k+1)(M-n)} + (M-n)(1-p)^{(k+1)n} \\ \cdot g(1-g)^{(k+1)(M-n-1)} \left. \right] + np(1-p)^{n-1} \left. \right\} \\ \cdot \left\{ \binom{M}{n} [1 - (1-g)^{(TP_s/a)n}]^n \right. & (14) \\ \cdot (1-g)^{(TP_s/a)(M-n)} \left. \right\} & ; j=2,3,\dots \end{cases} \end{aligned}$$

식 (8)를 이용하면 실제 전송에 성공한 기간의 평균 U 를 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \overline{U} & = E[U^{(1)}] + (J-1)E[U^{(2)}] \\ & = \frac{Mg(1-g)^{M-1}}{1 - (1-g)^M} q(w_0|z) + \frac{1}{(1-g)^{(TP_s/a)M}} \\ & \cdot \sum_{n=1}^M \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} [np(1-p)^{(k+1)n-1} (1-g)^{(k+1)(M-n)} \right. \\ & \quad + (M-n)(1-p)^{(k+1)n} g(1-g)^{(k+1)(M-n-1)}] \\ & \quad \cdot q(w_0|z) + np(1-p)^{n-1} \left. \right\} \\ & \cdot \left\{ \binom{M}{n} [1 - (1-g)^{(TP_s/a)n}]^n (1-g)^{(TP_s/a)(M-n)} \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

최종적으로 식 (12)와 (15)를 이용하여 무선 페이딩 채널 환경 하에서의 Basic CSMA/CA 프로토콜의 처리율을 구할 수 있다.

$$S = \frac{\overline{U}}{\overline{B} + \overline{I}} \quad (16)$$

2. Stop-and-Wait CSMA/CA

SW CSMA/CA 프로토콜의 처리율 분석에서 사용된 모든 정의와 가정은 Basic CSMA/CA의 처리율 분석시 사용한 것과 동일하다. 그러나 패킷전송 시간과 DIFS지연의 합을 TP 라고 정의하면, 전송에 성공할 때의 전송기간인 $TP_S(1 + \beta + \delta + 2a + f)$ 와 전송에 실패할 때의 전송기간인 $TP_F(1 + a + f)$ 와 구분하여 계산해주어야 한다. 이때, β 는 SIFS (Short Inter Frame Space)의 전송기간이며, δ 는 acknowledgement 패킷의 전송기간을 의미한다. j 번째 sub-busy 기간은 $(j-1)$ 번째 sub-busy 기간에 의존적으로 길이가 결정된다. 또한, j 번째 sub-busy기간의 길이는 패킷전송에 성공하는 경우와 실패하는 경우에 길이가 다르므로 전체 busy기간 및 전송에 성공하는 U 기간은 다음과 같은 재귀적인 형태로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} B(TP) & = f + d(TP) \\ & + \{ (TP_S + [1 - (1-g)^{(TP_s/a)}] B(TP_S)) \} u(TP) \\ & + \{ TP_F + [1 - (1-g)^{(TP_f/a)}] B(TP_F) \} [1 - u(TP)] \end{aligned}$$

$$U(TP) = \{1 + [1 - (1 - g)^{(TP,a)}]U(TP_S)\}u(TP) + \{[1 - (1 - g)^{(TP,a)}]U(TP_F)\} [1 - u(TP)] \quad (18)$$

여기서, $d(TP)$ 와 $u(TP)$ 는 식 (11)과 (13)을 이용하여 구한다.

$$d(1) = f[1 - (1 - g)^M] \\ d(TP) = \frac{a}{1 - (1 - g)^{(TP,a)M}} \left(\sum_{k=1}^M ((1 - p)^k - (1 - g)^{(TP,a)k}) \cdot [(1 - p)^k - (1 - g)^k] \right)^M (1 - g)^{(TP,a)M} \sum_{k=1}^M (1 - g)^{kM} \quad (19)$$

또한, busy 기간은 sub-busy 기간인 $B^{(1)}$ 에서 시작하여 연속되므로 평균 busy 기간은 식 (18)을 이용하여 $B^{(1)}$ 에 의하여 구할 수 있으며, 평균 전송에 성공하는 기간도 마찬가지로 구할 수 있다. 그러나, 여기서 전송에 성공하는 기간과 실패할 때의 기간이 서로 다르기 때문에 $B(TP_S)$, $B(TP_F)$, $U(TP_S)$ 와 $U(TP_F)$ 를 각각 구해주어야 한다.

$$u(1) = \frac{Mg(1-g)^{M-1}}{1 - (1-g)^M} q(w_0|z) \\ u(TP) = \frac{1}{1 - (1-g)^{(TP,a)M}} \cdot \sum_{n=1}^M \left\{ \sum_{k=1}^n [np(1-p)^{(k+1)n-1}(1-g)^{(k+1)(M-n)} + (M-n)(1-p)^{(k+1)n}g(1-g)^{(k+1)(M-n-1)}] + np(1-p)^{n-1} \right\} q(w_0|z) \cdot \left\{ \binom{M}{n} [1 - (1-g)^{(TP,a)n}] - (1-g)^{(TP,a)(M-n)} \right\} \quad (20)$$

식(18)의 TP 에 TP_S 와 TP_F 를 대입하면 각각 두 개의 이원일차 방정식을 구할 수 있으며, 그 해는 간단한 계산으로 구할 수 있다. 이렇게 해서 구한 값을 이용하여 다음과 같이 SW CSMA/CA 프로토콜의 처리율을 구한다.

$$S = \frac{U(1)}{B(1) + \frac{a}{[1 - (1-g)^M]}} \quad (21)$$

3. 4-Way Handshake CSMA/CA

이제는 4-Way Handshake(4-WH) CSMA/CA의 처리율을 구하도록 한다. 4-WH CSMA/CA 프로토콜은 패킷전송 이전에 RTS 패킷과 CTS 패킷을 송수신하여 채널사용을 예약하는 방식으로서, RTS 패킷의 길이는 γ 로 정의하고 CTS패킷의 길이는 θ 로 정의하며, SIFS의 길이는 β 로 정의한다. 만약, RTS 패킷의 전송에 성공하면, 패킷전송 시간 T^0 과 DIFS의 지연의 합을 TP_{4S} 라고 정의하면 이때의 기간은 $(\gamma + \delta + 3\beta + 4a + 1 + f)$ 가 되며, RTS 패킷의 전송시 충돌이 발생하는 경우의 T^0 와 DIFS의 합을 TP_{4F} 라고 정의하면 이때의 기간은 $(\gamma + a + f)$ 가 된다. 4-WH CSMA/CA 프로토콜의 처리율 분석의 방법은 SW CSMA/CA 프로토콜의 분석과 매우 유사하며, 식 (18)의 TP_S 를 TP_{4S} 로, TP_F 를 TP_{4F} 로 바꾸어 계산하면 간단하게 4-WH CSMA/CA의 채널 처리율을 구할 수 있다.

V. 패킷지연분석

1. Basic CSMA/CA

본 논문에서는 패킷지연을 구하기 위하여 처리율을 사용하여 임의의 패킷이 발생하여 패킷전송에 성공할 때까지의 지연기간을 구한다. 이것은 L 이라고 정의하였으며, 이 때 L 값은 패킷전송 기간에 대하여 정규화 되어진 값을 의미한다.

패킷지연은 네트워크의 트래픽(G)과 처리율(S)을 사용하여 계산한다. 임의의 한 패킷이 발생되어 전송에 성공할 때까지의 평균 재전송 시도 횟수는 $(G/S - 1)$ 이다. 여기서, 임의 패킷이 전송을 시도하여 채널을 액세스할 때까지의 지연을 R 이라고 정의하면, R 은 다음과 같은 세가지 경우에 대하여 다르게 나타난다. 1) 패킷이 idle 기간에 도착하는 경우, 2) 패킷이 지연기간에 도착하는 경우, 3) 패킷이 전송기간에 도착하는 경우이다. 1)의 경우에 대한 평균기간은 DIFS이며, 이러한 사건의 확률은 $I/(B+I)$ 가 되며, 2)의 경우에 대한 평균기간도 DIFS이며, 이때의 확률은 $D/(B+I)$ 이며, 마지막으로 3)의 경우에 대한 평균기간은 남아있는 패킷 전송기간과 backoff 지연기간이며, 이러한 사건이 발생할 확률은 $(B-D)/(B+I)$ 가 되며, 남아있는 전송기간은 renewal theory의 residual life 계산에 의하여 구할 수 있다. 여기서, T 를 Basic

CSMA/CA방식의 패킷전송시간이라고 정의하면, $(1+a)$ 가 되며, 이러한 점들을 고려하여 임의의 한 패킷에서의 평균 지연시간 R 을 구하면 다음과 같다.

$$\bar{R} = \frac{\bar{I}}{B + \bar{I}} f + \frac{\bar{D}}{B + \bar{I}} f + \frac{\bar{B} - \bar{D}}{B + \bar{I}} \left[\frac{(T+f+E[D])^2}{2(T+f+E[D])} \right] \quad (22)$$

이때, 식 (22)에서 $E[D]$ 는 식 (19)를 이용하여 구하며, \bar{D} 는 다음의 식 (24)와 같이 구한다.

$$\bar{D} = E[D^{(1)}] + (J - 1)E[D^{(2)}] \quad (23)$$

결국 Basic CSMA/CA의 패킷지연은 구하면 식 (24)와 같다.

$$L = \left(\frac{G}{S} - 1 \right) [T + \bar{Y} + \bar{R}] + T + \bar{R} \quad (24)$$

여기서, Y 는 재전송을 시도하는 패킷의 평균 랜덤 지연시간이다.

2. Stop-and-Wait CSMA/CA

SW CSMA/CA 프로토콜의 패킷지연은 Basic CSMA/CA의 패킷지연 계산과 유사한 방법으로 구하며, 이때 T_S 는 전송에 성공할 때의 시간으로 $(1+\beta+\delta+2a)$ 이고, T_F 는 전송에 실패할 때의 지연으로서 $(1+a)$ 로 정의하고 \bar{R} 를 구해보면,

$$\bar{R} = \frac{\bar{I}}{B + \bar{I}} f + \frac{\bar{D}}{B + \bar{I}} f + \frac{\bar{B} - \bar{D}}{B + \bar{I}} \cdot \left\{ P_{Succ} \left[\frac{(T_S + f + d(TP_S))^2}{2(T_S + f + d(TP_S))} \right] + P_{Fail} \left[\frac{(T_F + f + d(TP_F))^2}{2(T_F + f + d(TP_F))} \right] \right\} \quad (25)$$

이다. 이 때, TP_S 는 $1+\beta+\delta+2a+f$ 이고, TP_F 는 $1+a+f$ 이다. P_{Succ} 는 평균 패킷전송에 성공할 확률로 (G/S) 이며, P_{Fail} 는 평균 패킷전송에 실패할 확률로서 $1-P_{Succ}$ 가 된다. 평균 지연시간인 \bar{D} 는

$$\bar{D} = f + \{ d(TP_S) + [1 - (1-g)^{(TP_S)}] D(TP_S) \}$$

$$\cdot \{ u(1) + \{ d(TP_F) + [1 - (1-g)^{(TP_F)}] D(TP_F) \} \cdot [1 - u(1)] \} \quad (26)$$

이고, $d(TP_S)$ 와 $d(TP_F)$ 는 식 (20)에서 TP 대신 TP_S 와 TP_F 를 대입하여 구하며, $D(TP_S)$ 와 $D(TP_F)$ 는 식 (26)의 $u(1)$ 에 각각 TP_S 와 TP_F 를 대입하여 이원일차 연립방정식을 만들어 구할 수 있다. 결국 SW CSMA/CA의 패킷지연을 구하면 다음과 같다.

$$L = \left(\frac{G}{S} - 1 \right) [T_F + \bar{Y} + \bar{R}] + T_S + \bar{R} \quad (27)$$

3. 4-Way Handshake CSMA/CA

4-WH CSMA/CA 프로토콜의 패킷지연 분석은 SW CSMA/CA의 경우와 매우 유사하다. 처리율 분석시 TP_{4S} 는 $(1+\gamma+\theta+\delta+3\beta+4a+f)$ 로 정의하고, TP_{4F} 는 $(\gamma+a+f)$ 로 정의하였기 때문에 \bar{R} 을 구하게 되면

$$\bar{R} = \frac{\bar{I}}{B + \bar{I}} f + \frac{\bar{D}}{B + \bar{I}} f + \frac{\bar{B} - \bar{D}}{B + \bar{I}} \cdot \left\{ P_{Succ} \left[\frac{(T_{4S} + f + d(TP_{4S}))^2}{2(T_{4S} + f + d(TP_{4S}))} \right] + P_{Fail} \left[\frac{(T_{4F} + f + d(TP_{4F}))^2}{2(T_{4F} + f + d(TP_{4F}))} \right] \right\} \quad (28)$$

가 된다. 여기서, TP_{4S} 는 $(1+\gamma+\theta+\delta+3\beta+4a+f)$ 이고, TP_{4F} 는 $(\gamma+a+f)$ 이다. \bar{D} 를 구하는 방법도 SW CSMA/CA 방식과 동일하며 이때, 식 (26)에서 TP_S 대신 TP_{4S} 를 대입하고, TP_F 대신 TP_{4F} 를 대입하여 계산하여 구한다. 또한 정규화된 패킷지연 L 도 마찬가지로 식 (27)을 이용하여 구할 수 있다.

VI. 시뮬레이션 및 고찰

우선, 수신된 신호에 대하여 수신기에서의 캡처 ratio의 설정에 의한 캡처확률을 살펴보기 위하여 식 (6)을 사용하여 그림 2에서 캡처확률을 보이고 있다. 이 그래프에서 알 수 있는 것은 캡처 ratio가 증가함에 따라 캡처확률이 지수적으로 감소하는 것을 볼 수

있다.

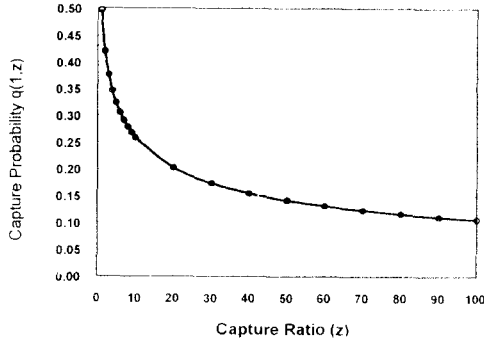


그림 2. 동시에 전송하는 터미널의 수에 대한 캡처 확률
Fig. 2 Capture probability for the capture ratio in the fading signal ($\sigma_s = 6$ dB, $\xi = 4$)

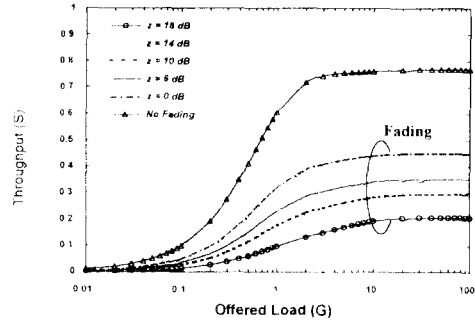
이 때, shadow fading의 표준편차는 6 dB 이고, ξ 는 4일 때이다. 이 두 값들은 일반적으로 실내 무선환경이나 micro cellular 통신망의 성능분석시 사용되는 수치들이다.

그림 3은 사용자가 5명일 때의 무선 fading을 고려한 기본 CSMA/CA 프로토콜의 처리율 및 패킷 지연을 나타내고 있는 그래프이다. 세모로 표시된 부분은 무선의 fading 환경이 고려되지 않은 분석의 결과들이며, offered load (G)는 채널의 단위 처리율에 대한 망 전체의 패킷 발생률의 비를 나타낸다. 또한, 패킷 지연은 패킷 전송시간에 대한 지연시간의 비를 의미한다. 무선 환경이 고려된 분석에서는 무선 환경을 고려하지 않은 분석결과에 비하여 캡처 ratio가 0dB 일 때, 최대 처리율이 약 50% 감소되는 것을 볼 수 있으며, 캡처 ratio가 증가함에 따라 처리율이 더욱 감소하고 패킷 지연은 더욱 증가하는 것을 볼 수 있다.

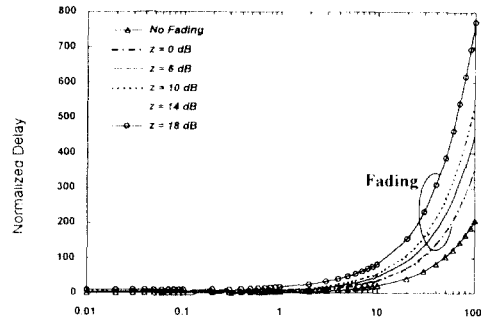
이러한 현상은 그림 3에서 캡처 확률이 최대 0.5로서, 무선 환경을 고려하지 않은 분석에서는 이 확률을 1로 가정하여 분석하였기 때문이다[1].

그림 4에서는 무선 환경에서의 캡처 ratio의 변화에 대한 SW CSMA/CA 프로토콜의 처리율 및 패킷 지연을 보이고 있는 그래프이다.

캡처 ratio가 증가함에 따라 처리율은 감소하였으며, 패킷 지연은 증가하였다. 또한, 처리율의 그래프에서 트래픽 양이 0.1과 1.0 사이에서는 캡처 ratio가 증



(a)



(b)

그림 3. Capture ratio에 따른 Basic CSMA/CA 프로토콜의 처리율 및 패킷 지연 비교 (a) 처리율, (b) 패킷 지연
Fig. 3 Throughput and packet delay comparison of basic CSMA/CA protocol for varying capture ratio (a) Throughput (b) Packet Delay

($\alpha = 0.01$, $p = 0.03$, $f = 0.06$, $Y = 0.06$, $M = 5$, $\sigma_s = 6$ dB, $\xi = 4$, $\nu = 4$)

감함에 따라 처리율이 상대적으로 급속히 저하하는 것을 볼 수 있다.

따라서, 캡처 효과는 망의 트래픽이 적을 때 상대적으로 시스템의 성능에 많이 영향을 주는 것을 알 수 있다.

그림 5는 무선 근거리 통신망의 사용자가 30명일 때, 세가지 CSMA/CA 프로토콜의 처리율과 패킷 지연을 분석한 그래프이다. 트래픽 양이 적은 경우 처리율의 경우 큰 차이를 보이지 않지만 트래픽이 증가함에 따라 4-WH CSMA/CA 프로토콜이 다른 두 CSMA/CA 방식에 비하여 상대적으로 우수한 처리율을 보이고 있으며, 패킷 지연의 관점에서도 상당히

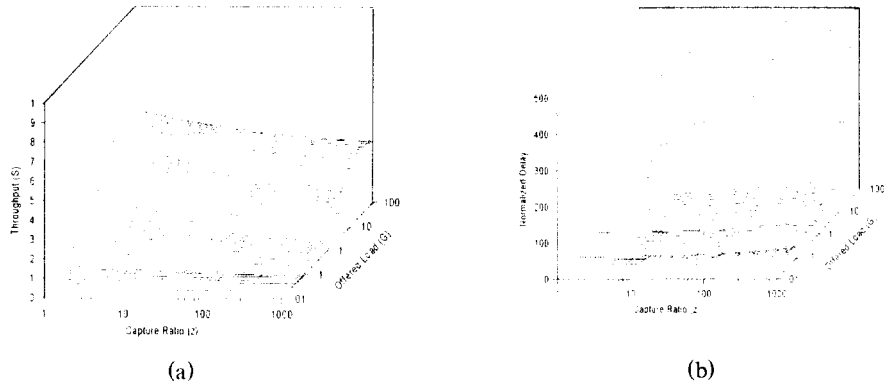


그림 4. Capture ratio 및 망의 부하에 따른 Stop-and-Wait CSMA/CA 프로토콜의 처리율 및 패킷지연 비교 (a) 처리율, (b) 패킷지연

Fig. 4 Throughput and packet delay comparison of basic CSMA/CA protocol for the capture ratio and offered load (a) Throughput (b) Packet Delay
 $(a = 0.01, p = 0.03, f = 0.06, \delta = 0.06, \beta = 0.03, \gamma = 0.06, M = 20, \sigma_s = 6\text{dB}, \xi = 4, z = 4)$

큰 차이를 보이고 있다.

결과적으로 볼 때, 무선환경의 다중경로 페이딩, 차폐현상 및 거리에 따른 감쇠를 고려할 때, 4-WH CSMA/CA 방식이 다른 두 방식에 비해 우수한 성능을 보이는 것을 알 수 있었다.

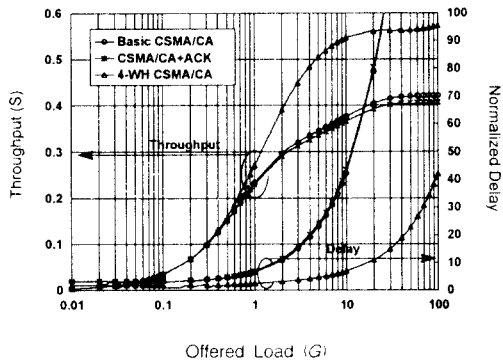


그림 5. 망의 부하에 따른 세가지 CSMA/CA 프로토콜의 처리율 및 패킷지연 비교

Fig. 5 Throughput and packet delay comparison of three types of CSMA/CA protocol for the offered load
 $(a = 0.01, p = 0.03, f = 0.06, \delta = 0.06, \beta = 0.03, \theta = 0.06, \gamma = 0.1, \gamma = 0.06, M = 30, \sigma_s = 6\text{dB}, \xi = 4, z = 4)$

Ⅶ. 결 론

본 논문에서는 레이리 페이딩, log-normal 차폐현상, 거리에 따른 감쇠에 따른 무선 채널환경과 수신기의 캡처효과를 고려하여 CSMA/CA 프로토콜의 성능을 분석하였다. CSMA/CA 프로토콜로서는 IEEE 802.11 표준 권고안을 기준으로 하여 Basic CSMA/CA, Stop-and-Wait CSMA/CA 및 4-Way Handshake CSMA/CA 방식을 고려하고 각 프로토콜의 채널 처리율과 패킷지연을 분석하였다.

우선, 다중경로 페이딩, 차폐현상 및 거리에 따른 감쇠에 의한 채널환경을 모델링하여 캡처 확률을 계산하였으며, 이를 이용하여 각 프로토콜에서의 처리율과 패킷지연을 구하였다. 분석결과로서, 캡처 ratio에 대한 캡처확률이 지수적으로 감소한다는 것을 알았으며, 또한, 애러가 없는 채널의 경우에 비하여 무선 채널의 특성을 고려하는 경우 시스템의 성능이 약 50% 정도 감소하는 것을 볼 수 있었다. 또한, 캡처효과와 지연의 경우는 상대적으로 트래픽 양이 적을 때 더욱 효과적이라는 결과를 얻을 수 있었으며, 무선의 환경에서는 4-WH CSMA/CA 프로토콜을 사용하는 것이 시스템의 성능을 고려할 때 상대적으로 유리하다는

것을 알 수 있었다.

본 논문의 결과 및 분석 방법이 향후 개발되어질 고속 무선 근거리 통신망 시스템의 설계 및 프로토콜 분석시 유용하게 사용되길 기대한다.

참 고 문 헌

1. K. Pahlavan and A. H. Levesque, "Wireless Data Communications," Proceeding of the IEEE, vol. 82, no. 9, pp. 1398-1430, Sep. 1994.
2. "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) And Physical Layer(PHY) Specification," IEEE Standard Draft, Dec. 1994.
3. "Special issue on the High Performance Radio Local Area Network(HIPERLAN)," An International Journal on Wireless Personal Communications, Vol. 3, No. 4, 1996.
4. C. V. D. Plas and J. P. M. G. Linnartz, "Stability of Mobile Slotted ALOHA Network with Rayleigh Fading, Shadowing, and Near-Far Effect," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 39, no. 4, pp. 359-366, Nov. 1990.
5. F. Borgonovo and M. Zorzi, "Slotted ALOHA and CDPA: A comparison of Channel Access Performance in Cellular Systems," Proc. IEEE INFOCOM '96, pp. 696-703, San Francisco, USA, Mar. 26-28, 1996.
6. K. C. Huang and K. C. Chen, "Interference Analysis of Nonpersistent CSMA with Hidden Terminals in Multicell Wireless Data Networks," Proc. IEEE PIMRC '95, pp. 907-911, Toronto, Canada Sep. 27-29, 1995.
7. A. Visser and M. E. Zarki, "Voice and data transmission over an 802.11 Wireless network," Proc. IEEE PIMRC '95, pp. 648-652, Toronto, Canada Sep. 27-29, 1995.
8. J. P. Linnartz, Narrowband Land-Mobile Radio Networks, Artech House 1993.
9. R. O. LaMaire and M. Zorzi, "Effect of Correlation in Diversity Systems with Rayleigh Fading, Shadowing, and Power Capture," IEEE J. Select.

Areas. Commun., vol. 14, no. 3, pp. 449-461, Apr. 1996.

10. M. Abramowitz and I. A. Stegun, Handbook of Mathematical Functions With Formulas, Graphs, and Mathematical Tables, National Bureau of Standards, 1982.
11. J. H. Kim and J. K. Lee, "Throughput and Packet Delay Analysis of IEEE 802.11 MAC Protocols for Wireless LANs," Proceeding of MIDMC '96, Seoul, Korea. pp. 530-535, 1996.



김 재 현(Jae Hyun Kim) 정회원
 1991년 2월: 한양대학교 전자계산학과(공학사)
 1993년 2월: 한양대학교 대학원 전자계산학과(공학석사)
 1996년 8월: 한양대학교 대학원 전자계산학과(공학박사)

현재: UCLA 전기공학과 post doctor 연구중
 ※관심분야: 무선 LAN 및 무선 ATM망 프로토콜 성능분석, 무선 통신망 라우팅 성능분석, Queueing Theory 등.



신 형 철(Hyung Chul Shin) 정회원
 1997년 2월: 한양대학교 전자계산학과(공학사)
 현재: 한양대학교 대학원 전자계산학과 석사과정
 ※관심분야: 고속 무선 LAN 및 무선 ATM망 성능평가, 트래픽 제어, Queueing Theory.



이 정 규(Jong Kyu Lee) 정회원

1979년 2월: 한양대학교 전자공
학과(공학사)

1986년 8월: UCLA 전자공학과
(공학석사)

1989년 2월: UCLA 전자공학과
공학박사(컴퓨터 네
트워크 전공)

1979년 3월~1984년 5월: 국방과학 연구소 연구원.

1989년 3월~1990년 2월: 삼성전자 정보통신연구소 수
석 연구원.

1990년 3월~현재: 한양대학교 전자계산학과 부교수

1997년 3월~현재: 한양대학교 공학기술연구소 부소장

※관심분야: 무선 데이터 통신, 통신망 성능분석, 이
동 및 위성 통신망 분석, Stochastic Pro-
cess 등.