

# 무선환경에서 포획효과를 고려한 CSMA/CD 프로토콜의 성능분석

## Performance Analysis of CSMA/CD in Radio Environment with Capture Effect

史朱嬉\*, 玄仁福\*, 郭慶燮\*

(Ju-Hee Sa, In-Bok Hyun and Kyung-Sup Kwak)

### 요 약

본 논문에서는 레일리 페이딩(Rayleigh fading)과 산란효과(Scattering effect), 원근효과(Near-far effect)를 고려한 무선 채널환경에서 CSMA/CD(Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) 시스템의 성능을 분석하였다. 또한 전파 특성에 따른 신호 전력의 불규칙성을 이용한 포획기술(capture effect)을 CSMA/CD 프로토콜에 적용시켰고, 마르코프(Markov) 모델링을 이용하여 성능의 향상 정도를 연구하였다. 그 결과 무선 환경에 기인한 채널 오류만을 고려한 경우에는 CSMA/CD 시스템의 효율은 저하됨이 나타났으나 포획효과를 고려하면 시스템의 성능이 향상됨은 물론, 시스템이 매우 안정화됨을 확인하였다.

### Abstract

In this paper we analyzed, using Markov modeling, the performance of CSMA/CD over the wireless channel which is characterized by near-far effect, shadowing and Rayleigh fading. The analysis shows that throughput of CSMA/CD is degraded by channel error. However, if capture effect which arises from the randomness of power level of received signal due to the fading phenomena of electromagnetic waves is taken into consideration, the system performance is much improved and the system stability is also made better.

### 1. 서 론

무선 LAN(Wireless Local Area Networks)과 무선 개인 통신(Wireless personal communications)에 관한 연구가 활발히 진행됨에 따라 무선 데이터 통신에 알맞는 다원 접속 프로토콜에 대한 관심이 커지고 있다<sup>[1-5]</sup>. 무선 LAN의

장점으로는 단말기 이동의 용이성, 설치의 편리성, 유지 및 보수의 간편성 등을 들 수 있다.

무선 통신시스템에서 페이딩은 피할 수 없는 현상이다. 페이딩은 신호의 진폭뿐만 아니라 위상까지도 변화시키므로 시스템의 성능에 많은 영향을 끼친다. 페이딩의 영향을 분석하기 위하여, Arnbak는 레일리 페이딩채널 환경에서 ALOHA 시스템을 연구하였다<sup>[10]</sup>. 무선환경에서의 ALOHA 프로토콜의 성능분석을 위하여 포획효과(capture effect)를 고려함으로써 시스템의 효율이 증가함을 보였다<sup>[11]</sup>. CSMA/CD에 대하여 원근현상, 그늘현상, 레일리 페이딩으로 모델링을 하여 분석한 연구는 아

\* 仁荷大學校 電子工學科

(Dept. of Electronic Engineering, Inha Univ.)

※이 논문은 1995년도 仁荷大學校 교내 연구비에 의하여 연구되었음.

接受日:1997年7月18日, 修正完了日:1997年11月27日

직까지 없는 것으로 사료된다.

본 논문에서는 비교적 시스템의 설계가 간단한 협대역 CSMA/CD 프로토콜의 성능 변화를 알아보고, 시스템에서 페이딩에 기인한 전파 특성에 따른 신호전력의 불규칙성을 이용한 포획기술을 적용했을 때 마르코프(Markov) 모델링을 통한 CSMA/CD의 성능평가를 수행한다. 이때 채널은 원근현상, 그늘현상, 레일리 페이딩으로 모델링하였다<sup>[6-7]</sup>. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 CSMA/CD 시스템을 모델링하였으며, III장에서는 신호 포획을 고려한 CSMA/CD의 성능을 분석하였다. 마지막으로 전체적인 결론을 IV장에서 제시하였다.

## II. 모델링

무선 채널에서 신호를 전송할 때 고려되어야 하는 가장 중요한 사항은 채널의 특성이다. 본 연구에서 고려하고자 하는 실내 무선 채널은 대부분의 경우 레일리 페이딩의 특성을 갖게 된다. 이러한 환경에서 전송된 신호의 수신율은 페이딩 정도에 따라 저하되므로 다원 접속 프로토콜의 효율을 저하시키는 요인이 된다. 그러나 동시에 전송된 패킷들이 이러한 페이딩현상으로 인해 각각 다른 정도의 신호 감쇄율을 갖는 점을 이용해서 신호 포획기술을 이용한다면 다원 접속 프로토콜의 효율은 크게 증대될 수 있다. 이와 같은 환경에서 CSMA/CD를 분석하기 위해 다음과 같은 모델을 설정한다.

### 1. 전파 및 채널 모델

이동 무선 채널은 다중 경로 페이딩, 그늘현상(shadowing), 원근효과(near-far effect)와 같은 서로 독립적인 요소들의 결합으로 이루어져 있다.

원근효과는 페이딩이나 그늘현상에 의한 영향을 무시한다면 송수신기 사이의 거리에 의해 발생하는 전파 특성으로 수신 단말기와 송신 단말기 사이의 거리가  $r$ 일 경우 수신 신호의 전력은 다음과 같이 나타난다<sup>[7]</sup>.

$$P_a = C \cdot r^{-\beta} \quad (1)$$

여기서  $P_a$ 는 수신 신호의 평균 전력을 말하며  $\beta$ 값은 전파 상수으로써 이동 채널의 경우 보통 2에서 4의 값을 갖는다. 또한  $C$ 는 송수신 시스템과 안테나에 따른

상수이다. 본 논문에서는 계산의 간편상  $C=1$ 로 가정한다.

그늘현상은 실내의 장애물 등에 의해 신호가 감쇄됨으로써 나타나는 것으로 원근효과에 중첩된다. 그늘현상으로 인한 신호 전력  $P_l$ 의 확률적 분포는 원근효과에 의한 신호  $P_a$ 에 대해 로그 정규 분포를 갖는다<sup>[7]</sup>.

$$f_{P_l}(P_l) = \int_0^\infty \frac{f(r)}{\sqrt{2\pi\sigma_s P_l}} e^{-\frac{(\ln P_l + \beta \ln r)^2}{2\sigma_s^2}} dr \quad (2)$$

여기서  $f(r)$ 은 수신단말기 주위에 분포되는 총 트래픽의 공간적인 분포를 나타내는 확률분포함수로 거리 함수이고,  $\sigma_s$ 는 로그 정규 분포의 표준 편차이다.

다중경로 페이딩을 나타내는 모델으로써 대표적인 경우가 레일리 페이딩인데 이는 직접파 경로가 존재하지 않는 실내 무선 채널에 대해서도 적합한 모델이다<sup>[6]</sup>. 이러한 레일리 페이딩에 의한 수신 신호의 순간 전력  $P_s$ 는  $P_l$ 에 대해 지수 함수적인 분포를 갖고 빠른 페이딩 특성을 나타낸다. 이러한 세 가지 특성을 모두 고려한 수신 신호의 순간 전력  $P_s$ 에 대한 분포는 다음과 같다<sup>[7]</sup>.

$$f_{P_s}(P_s) = \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{1}{P_l} e^{-\frac{P_s}{P_l}} \frac{f(r)}{\sqrt{2\pi\sigma_s P_l}} \times e^{-\frac{(\ln P_l + \beta \ln r)^2}{2\sigma_s^2}} dr dP_l \quad (3)$$

전송 신호  $P_s$ 는 레일리 페이딩과 그늘현상에 의해서 독립적인 특성을 갖게 된다. 이러한 채널을 통해서 신호를 전송할 경우 수신율이 감소될 수 있다. 따라서 채널 특성으로 인해 발생하는 전송 오류를 해석하기 위해 신호를 오류없이 수신할 수 있는 채널 상태를 Good 상태라하고 수신 신호에 오류가 생겨서 재전송이 요구되는 채널 상태를 Bad 상태라 정의한다<sup>[8]</sup>. Good 상태는 수신 신호의 전력이 임의의 임계값 이상이어서 패킷 수신이 성공적인 상태이며, Bad 상태는 그 반대의 경우이다. Good 상태일 확률을  $\epsilon$ 이라 하면  $\epsilon$ 은 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \epsilon &= P[P_s > z_0] \\ &= \int_{z_0}^\infty f_{P_s}(x) dx \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $z_0$  는 수신 가능한 포획율(capture ratio)을 말한다. 이러한 채널 환경에 적합한 신호 포획모델은 충돌한 신호들의 전력차를 이용한 포획모델(capture model)이다.

2. 신호 포획모델

여러 개의 신호가 충돌했을 때 포획이 가능하기 위해서는 하나의 신호 전력이 나머지 신호들의 전력에 의한 간섭 전력보다 충분히 커야 한다. 즉,

$$P_s > z \cdot P_n \tag{5}$$

여기서  $P_n$  은 포획하고자 하는 신호를 제외한 나머지 신호들의 상호 간섭 전력이고  $z$  값은 임계값이다. 여기서의 임계값은 위에서의 포획율과 같다고 가정함으로써 포획율이  $z_0$  인 시스템을 패킷 전송 오류와 신호 전력을 기준으로 하는 포획현상에 의한 성능 평가를 동시에 할 수 있다.

위의 전과 모델에 대한 포획확률을 구하기 위해 라플라스 변환을 이용한다. 상호 간섭 전력의 확률 밀도 함수에 대한 라플라스 변환은 다음과 같이 정의한다.

$$\Phi_{P_n}(\nu) \equiv \int_0^\infty e^{-\nu x} f_{P_n}(x) dx \tag{6}$$

이때,  $i$  개가 충돌해서  $i-1$  개의 간섭 전력이 존재할 때 포획하고자 하는 신호의 평균 전력이  $P_0$  일 경우 포획확률(capture probability)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Pr(\text{capture} | i-1, P_0) \\ = \Pr\left(\frac{P_s}{P_n} > z | i-1, P_0\right) = \Phi_{P_n}\left(\frac{z}{P_0}\right) \end{aligned} \tag{7}$$

간섭 전력  $P_n$  이  $(i-1)$  개의 독립적인 페이딩 신호들의 비코히어런트(noncoherent) 성분의 합에 의한 것이라면 이것의 결합 확률 밀도함수(joint pdf)는 각각의 신호 전력에 대한 확률밀도 함수의  $(i-1)$  번의 대적(convolution)으로 표시된다. 이것은 라플라스 변환에 의해 하나의 전력에 대한 특성 함수의  $(i-1)$  제곱이 된다. 즉,

$$\Pr(\text{capture} | i-1, P_0) = \Phi_{P_n}^{i-1}\left(\frac{z}{P_0}\right) \tag{8}$$

이다. 여기서 각 신호 전력에 대한 라플라스 변환은 식(3)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Phi_{P_n}(\nu) &= \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{1}{1+\nu\rho} \frac{f(r)}{\sqrt{2\pi\sigma_s P_i}} \times e^{-\frac{(\ln P_i + \beta \ln r)^2}{2\sigma_s^2}} dr dP_i \\ &= \int_0^\infty W(\nu, r) f(r) dr \end{aligned} \tag{9}$$

여기서

$$W(\nu, r) \equiv \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^\infty \frac{e^{-x^2}}{1 + \nu r^{-\beta} e^{x\sigma_s \sqrt{2}}} dx \tag{10}$$

를 정의하면, 식(9)는 포획하고자 하는 신호를 전송한 단말기와 수신 단말기와의 거리가  $r$  일 때 간섭 신호에 대한 영향을 나타낸다.

그늘현상이 없는 경우에는  $P_i = r^{-\beta}$  가 되고,  $\sigma_s = 0$  이 되어서

$$W(\nu, r) = \frac{1}{1 + \nu r^{-\beta}} \tag{11}$$

가 된다. 따라서 그늘현상이 없는 경우 신호의 평균 전력을 조건으로 하는 포획확률은 다음과 같다.

$$\Pr(\text{capture} | i-1, r_0^{-\beta}) = \left[ \int_0^\infty \frac{f(r)}{1 + z r_0^\beta r^{-\beta}} dr \right]^{i-1} \tag{12}$$

이다. 여기서  $r_0$  는 수신 단말기와 포획신호를 보낸 송신 단말기 사이의 거리이다.

그림 1은  $\sigma_s$  의 변화에 따른  $r$ 에 대해 정규화된  $W(1, r)$ 에 대한 관계도이고 이것은 간섭 신호들이 거리에 따라 포획신호에 미치는 영향을 나타낸다. Abramson<sup>[9]</sup>의 모델에서와 같이 수신 단말기로부터 일정한 거리 이후에서 전송되는 패킷의 간섭 전력은 무시한다고 가정하면  $W(1, r)$  값이 이 그림에서 점선으로 나타나는 계단 함수라고 할 수 있다. 그러나 실제로는 페이딩이나 그늘현상에 의해서 그러한 임의의 거리보다 먼 거리에서 전송된 신호라 할지라도 그것이 축적되면 상당한 간섭을 일으킬 수 있다. 따라서 Abramson의 모

델보다 식(10)이 신호 간섭에 대한 영향을 자세히 표현하고 있다.

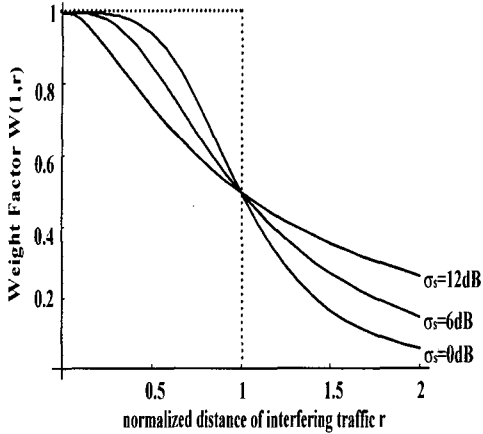


그림 1.  $\sigma_s$  변화에 따른  $W(1,r)$

Fig. 1.  $W(1,r)$  with variance of  $\sigma_s$ .

식(12)으로 표현되는 포획확률은 포획신호를 전송한 단말기의 거리 즉, 수신 단말기와 송신 단말기간의 평균 전력에 주어진 조건하에서 얻어지는 포획확률이다. 그러나 이 식을 마코프 체인에서 이용하기 위해서는 송수신기 사이의 거리에 상관없는 확률이어야 한다. 이를 위해서는 식(8)이나 식(12)는 포획하고자 하는 신호의 그늘 현상과 원근효과로 인한 확률 밀도 함수로 평균을 취해야 한다. 따라서  $i-1$ 개의 간섭 신호가 존재하는 조건에 대한 포획확률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Pr\{\text{capture} \mid i-1\} &= \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{f(r_t)}{\sqrt{2\pi}\sigma_s P_0} e^{-\frac{(\ln P_0 + \beta \ln r_t)^2}{2\sigma_s^2}} \\ &\quad \times \left[ \Phi\left(\frac{z}{P_0}\right) \right]^{i-1} dP_0 dr_t \end{aligned} \quad (13)$$

만일 수신 단말기 주위에 분포되는 트래픽이 반경  $0 < r < 1$  사이에 균일하게 분포되어 있다고 가정하면  $f(r)$ 은 다음과 같다.

$$f(r) = \begin{cases} 2r, & 0 < r < 1 \\ 0, & r > 1 \end{cases} \quad (14)$$

이식을 식(13)에 대입시키고 정리하면 다음과 같다.

$\Pr\{\text{capture} \mid i-1\}$

$$= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^1 \int_{-\infty}^\infty r_t e^{-x^2} \times \left[ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^\infty f(x,y) e^{-y^2} dy \right]^{i-1} dx dr_t \quad (15)$$

여기서  $f(x,y)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$f(x,y) \equiv 1 - \left( \sqrt{z} r_t^2 e^{\frac{1}{2}\sqrt{2}\sigma_s(x-y)} \right) \times \arctan\left( z^{-1/2} r_t^{-2} e^{\frac{1}{2}\sqrt{2}\sigma_s(x-y)} \right) \quad (16)$$

따라서  $i$ 개의 패킷이 충돌했을 때 그 중의 하나가 포획될 확률을  $q_i$ 라 하면 이것은 다음과 같다.

$$q_i = i \cdot \Pr\{\text{capture} \mid i-1\}, \quad i > 1 \quad (17)$$

단,  $q_1 = \epsilon$ 으로 가정하므로써 이제까지의 신호 포획에 대한 해석이 패킷 전송이 하나뿐이었을 때는 무조건 성공이라고 가정하고 해석한 결과에 대해 좀 더 실제적인 방법을 제시한다. 즉, 패킷 충돌이 발생하지 않아도 채널 특성에 의해 전송 오류가 발생할 수 있음을 고려하였다. 또한  $q_0 = 1$ 이라고 가정함으로써 휴지기간에 대한 감지는 정확하다고 가정하였다.

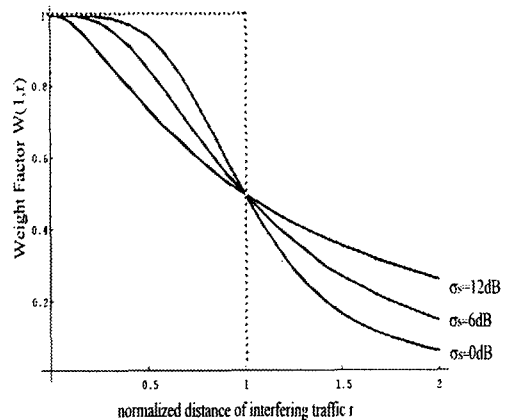


그림 2. 채널 환경에 따른 포획확률

Fig. 2. Probability of Capture in the various channel environment.

그림 2는 각각의 채널 환경에 따른 포획확률을 나타내는 그림이다. 페이딩현상만 고려했을 때보다 다른 채널 특성을 고려할수록 신호들간의 전력차가 커지므로 포

획확률도 증가한다. 그러나 포획확률은 충돌 패킷의 수가 2일 때가 가장 크게 나타나고 그 이후 급격히 감소함을 볼 수 있다.

### III. 성능분석

#### 1. CSMA/CD 시스템

전파의 감지(sensing)를 위한 지연을  $\alpha$ 라 정의하면 CSMA 프로토콜의 효율은  $\alpha$ 값에 의존하게 된다. 즉,  $\alpha$ 의 증가에 따라 감소되고, 채널 전송률의 증가, 패킷 크기의 감소에 따라 감소된다.  $\alpha$  단위로 슬롯의 길이를 정하고, 모든 데이터 패킷은 일정한 길이를 가지며 하나의 패킷을 전송하는 평균 시간은 1이라고 가정한다. 이때 패킷 전송이 성공했는지, 충돌이 발생했는지 채널이 휴지 상태인지에 따라 채널 상태를 나타내는 피드백 정보(패킷이 전송에 성공하면 1, 충돌이 발생하면 e, 채널이 휴지상태이면 0)는  $\alpha$  시간 후에 도착된다. CSMA 시스템의 경우 이런 피드백이 도착되기 위해서는 패킷 전송후 전송이 성공했는지 충돌이 발생했는지  $1 + \alpha$  후에야 받을 수 있다.

CSMA/CD 시스템은 패킷 전송 후에도 계속 채널을 감지하기 때문에 충돌이 발생한 경우에는 패킷 전송후  $\alpha$  시간 후에 피드백을 받을 수 있다. 따라서 CSMA/CD 시스템의 경우 피드백을 받는 시간은 휴지 상태일 경우와 충돌이 발생한 경우에는  $\alpha$  시간, 패킷 전송이 성공한 경우에는  $1 + \alpha$  시간이 걸린다.

채널이 사용중이거나, 충돌이 생겨서 자신의 패킷을 전송하기 위하여 준비하고 있는 단말기를 전송이 지체된(backlogged) 단말기라 한다. 전송이 지체된 단말기가 발생되는 경우는 채널이 사용중일 때 새로운 패킷이 도착한 경우, 충돌에 의해서 전송이 실패한 경우, 채널 오류에 의해 전송이 실패한 경우를 들 수 있는데 전송이 지체된 단말기들은 재전송을 시도한다.

단말기의 수는 제한이 되어 있지 않으며 모든 단말기는 하나 이상의 패킷을 가질 수 없다고 가정한다. CSMA/CD 프로토콜의 알고리즘은 다음과 같다.

- i) 전송할 패킷이 준비되면 채널이 휴지 상태(패킷 전송이 없는 상태)인지, 사용중인 상태(패킷 전송 중인 상태)인지를 감지한다.

- ii) 만일 채널이 휴지 상태이면 즉시 다음 슬롯에서 전송한다.
- iii) 채널이 사용중이면 랜덤 시간 동안 기다린 후에 전송한다.
- iv) 패킷을 전송하는 도중에 송신단말기는 패킷이 충돌하는지를 감지하게 된다.
- v) 패킷 충돌(패킷 전송이 동시에 일어난 상태)이 발생하면, 랜덤 시간 동안 기다린 후에 충돌이 일어난 패킷부터 다시 재전송을 시작한다.

이때 ii, iii과정에서 적용되는 채널포획방법에 따라 nonpersistent CSMA/CD, 1-persistent CSMA/CD, p-persistent CSMA/CD로 구분할 수 있다. 전송해야 할 패킷이 있으면 현재 전송중인 패킷의 전송이 끝날 때까지 계속해서 채널을 감지하다가 휴지 상태가 되면 무조건 전송을 시도하는 방식이 1-persistent CSMA/CD인데 이 방식은 여러 개의 패킷이 충돌되었을 때 재충돌의 확률이 매우 높아지게 된다. 이것을 보완하기 위해 휴지 상태가 되면 확률 p를 가지고 전송하는 방식이 p-persistent CSMA/CD이다. 그러나 전송해야 할 패킷이 있으면 랜덤 시간동안 기다린 후에 다시 채널을 감지해서 휴지상태이면 임의의 확률로 전송을 시도하는 방식이 nonpersistent CSMA/CD이다. nonpersistent CSMA/CD에서는 전송해야 할 각 단말기들이 각각 랜덤 시간동안 지연시키기 때문에 대부분의 충돌을 피할 수 있다. 특히 트래픽이 높아지면 1-persistent CSMA/CD에 비해 효율이 더 높다. 본 논문에서는 이 세 가지 방식 중에서 성능이 가장 우수한 nonpersistent CSMA/CD방식을 적용했다.

해석의 편의를 위해 시스템은 슬롯의 길이가  $\alpha$ 이고, 전송하고자 하는 패킷의 길이는 모두 1이라고 가정한다. 전송이 지체된 패킷의 수  $n$ 을 상태변수로하고, 휴지슬롯을 상태전이 시간으로 하는 마코프 체인을 이용한다. CSMA/CD에서 휴지상태의 끝점에서 상태전이를 한다고 가정하면, 패킷전송이 없으면  $\alpha$ 시간, 패킷1개가 전송에 성공할 경우에는  $1 + \alpha$ 시간, 패킷충돌이 일어날 경우에는  $2\alpha$ 시간후에 다음 휴지상태로 천이 한다<sup>[12]</sup>.

새로운 패킷이 단말기에 도착하는 분포는 슬롯당 평균  $\lambda$ [패킷/초]를 갖는 포아송(Poisson) 분포를 갖는다고 가정하면, 한 슬롯에  $j$ 개의 패킷이 도착할 확률은 다음과 같다.

$$p_j = \frac{(\lambda\alpha)^j}{j!} e^{-\lambda\alpha} \quad (18)$$

재전송 분포가 이항(Binomial) 분포를 갖는다고 가정 하면, 전송이 지체된 패킷의 수가  $n$ 일 때 재전송하고자 하는 패킷이  $i$ 개일 확률은 다음과 같다.

$$b_i(n) = \binom{n}{i} f^i (1-f)^{n-i} \quad (19)$$

여기서, 전체 단말기 수를  $m$ 이라 하면  $f$ 는 패킷이 지체됨이 없이 전송될 확률로 다음과 같다.

$$f = 1 - e^{-\lambda/m} \quad (20)$$

$f$ 는 입력 평균트래픽량( $\lambda$ )와 전체 단말기 수에 의존하는 확률이고, 일반적으로 순시 트래픽에 의존하면 랜덤변수가 된다. 따라서 nonpersistent CSMA/CD의 상태 천이 확률을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P[n_{t+1} = k | n_t = n] = \begin{cases} p_0 b_1(n) & , k = n-1 \\ p_1 b_0(n) + p_0(1-b_1(n)) & , k = n \\ p_1(1-b_0(n)) & , k = n+1 \\ p_{k-n} & , k > n+1 \end{cases} \quad (21)$$

여기서  $n_t$ 는  $t$ 번째 슬롯에서의 전송이 지체된 패킷의 수를 의미한다.

위와 같은 절차를 거친 슬롯형 CSMA/CD의 상태  $n$ 에서의 시스템 효율(throughput)은 다음과 같이 유도할 수 있다<sup>[12,14]</sup>.

$$S = \frac{g(n)e^{-g(n)}}{\alpha + g(n)e^{-g(n)} + \alpha[1 - (1+g(n))e^{-g(n)}]} \quad (22)$$

여기서  $g(n) = \lambda\alpha + nf$ 이다. 위식은  $g(n) = 0.77$ 에서 최대가 되며 최대값은  $1/(1+3.31\alpha)$ 가 된다. 시스템효율의 의미는 단위시간당 성공적으로 전송된 패킷의 수를 말한다.

그림 3에서는 CSMA와 CSMA/CD의 효율을 비교했는데 여기서 CSMA/CD가 최대 효율도 더 높고, 트래픽이 많아질수록 효율이 감소되는 정도도 더욱 적어서 안정성 면에서 더욱 우수함을 알 수 있다. 이러한 CSMA/CD의 해석은 유선 채널에 대해서만 행해졌을 때는 매우 간단한 형태로 해

석이 가능하지만 무선채널을 이용하는 경우에는 채널 잡음이나 신호 페이딩현상에 대한 경우도 고려해야 하므로 좀더 구체화된 해석방법을 요구한다. 다음 절에서는 이러한 무선 채널에 대한 모델링과 함께 이에 대한 해석을 한다.

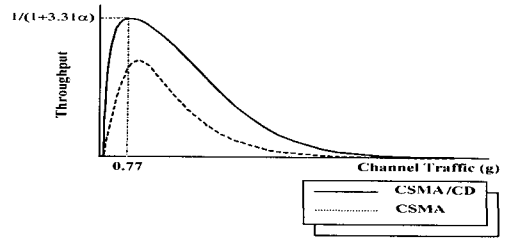


그림 3. CSMA와 CSMA/CD의 효율 비교

Fig. 3. Comparison of performance between CSMA and CSMA/CD.

## 2. 신호 포획을 고려한 CSMA/CD의 성능분석

II장에서 고려한 채널 모델을 이용해서 채널 특성에 의한 전송 오류와 신호 포획현상을 고려한 nonpersistent CSMA/CD의 각 상태천이에 대한 상태 천이 확률은 다음과 같다. 이때 앞에서의 CSMA/CD시스템의 성능 분석에서 사용한 모델을 이용하였다.

$$P[n_{t+1} = k | n_t = n] = \begin{cases} \epsilon p_0 b_1(n) + \sum_{i=2}^n p_0 b_i(n) q_i & , k = n-1 \\ \epsilon p_1 b_0(n) + \sum_{i=2}^n p_1 b_i(n) q_{i+1} + (1-\epsilon)p_0 b_1(n) + p_0 b_0(n) + \sum_{i=2}^n p_0 b_i(n)(1-q_i) & , k = n \\ \sum_{i=0}^n p_2 b_i(n) q_{i+2} + (1-\epsilon)p_1 b_0(n) + \sum_{i=1}^n p_1 b_i(n)(1-q_{i+1}) & , k = n+1 \\ \sum_{i=3}^n \sum_{j=0}^i p_j b_i(n) q_i + \sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^j p_j b_i(n)(1-q_{i+j}) & , k \geq n+2 \end{cases} \quad (23)$$

이때 패킷 전송이 성공할 확률은 다음과 같다.

$$P_s = \epsilon(p_0 b_1(n) + p_1 b_0(n)) + \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{i=0}^j p_j b_i(n) q_{i+j} - (p_0 b_1(n) + p_1 b_0(n)) q_1 = \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{i=0}^j p_j b_i(n) q_{i+j} \quad (24)$$

위식에서는 패킷 전송시에 채널의 상태를 고려한 파라미터  $\epsilon$ 과  $q_i$ 가 포함되어 있다.

$n$  상태에서의 변위(drift)는 상태전이 시간동안의 평균 입력과 평균 출력의 차로써 정의된다<sup>[12]</sup>.

$$d_n = E[A_n] - E[D_n] \quad (25)$$

여기서  $A_n$  및  $D_n$ 은 상태  $n$ 에서 유입 패킷 및 유출 패킷의 수이다. 시스템이 안정하기 위해서는 이 변위 값이 음수의 값을 가져야 하는데, 이때 안정된 시스템을 얻기 위한 최대 입력이 시스템의 효율을 나타낸다. 본 논문에서는 시스템의 성능 분석을 이와 같은 방법으로 진행하였다. 먼저  $I$ 는 천이 시간을 나타내고,  $P_c$ 는 충돌 확률,  $P_s$ 는 성공 확률,  $P_I$ 는 휴지 확률,  $P_e$ 는 오율이라 하면, CSMA/CD의 성능 분석을 위한 상태 천이 시간은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E[I] &= \alpha \times P_I + 2\alpha \times P_c + (1+\alpha) \times (P_s + P_e) \\ &= \alpha e^{-G} + (1+\alpha) \\ &\quad \times \left[ \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} p_j b_i(n) q_{i+j} + (1-\epsilon) G e^{-G} \right] + 2\alpha P_c \end{aligned} \quad (26)$$

여기서 총 트래픽을  $G = \lambda \alpha + n f$  라 가정하였다. 따라서 입력율은 다음과 같다.

$$E[A_n] = \lambda \left[ \alpha e^{-G} + (1+\alpha) \left[ \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} p_j b_i(n) q_{i+j} + (1-\epsilon) G e^{-G} \right] + 2\alpha P_c \right] \quad (27)$$

이때 충돌 확률은

$$\begin{aligned} P_c &= \sum_{i=1}^n p_i b_i(n) (1-q_i) + \sum_{i=1}^n (1-q_{i+1}) + \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} p_j b_i(n) (1-q_{i+j}) \\ &= [1 - (1-\epsilon)(1+G)e^{-G}] \\ &\quad - \int_0^1 \int_0^{\infty} \frac{2r_1}{\sqrt{2\pi\sigma_r P_u}} e^{-\frac{(\ln P_u + \beta \ln r_1)^2}{2\sigma^2}} G e^{-G + G\alpha(\frac{r_1}{P_u})} dr_1 dP_u \end{aligned} \quad (28)$$

이다. 따라서 상태  $n$ 에서의 변위는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} d_n &= \\ &\lambda \left[ \alpha e^{-G} + (1+\alpha) \left[ \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} p_j b_i(n) q_{i+j} + (1-\epsilon) G e^{-G} \right] + 2\alpha P_c \right] \\ &\quad - \left[ \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} p_j b_i(n) q_{i+j} \right] \end{aligned} \quad (29)$$

따라서, 안정화된 상태에서 시스템의 효율은 다음과 같다.

$$S = \frac{\sum_{j=0}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} p_j b_i(n) q_{i+j}}{\alpha e^{-G} + (1+\alpha) \left[ \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} p_j b_i(n) q_{i+j} + (1-\epsilon) G e^{-G} \right] + 2\alpha P_c} \quad (30)$$

컴퓨터 시뮬레이션은 Sun Ultra Sparc Workstation에서 동작하는 Cadence사의 BONEs Designer를 사용하였다. 그리고 페이딩현상과 그늘현상, 원근효과는 서로 독립적으로 발생을 시켜서 결합을 시켰다.

그림 4는 순수 페이딩만 존재하는 환경에서 포획을 고려한 CSMA/CD의 효율을 임계값  $z$ 의 변화에 대해 비교한 것이다. 임계값  $z$ 의 값이 증가함에 따라 또 트래픽이 증가함에 따라 효율이 떨어짐을 알 수 있다.

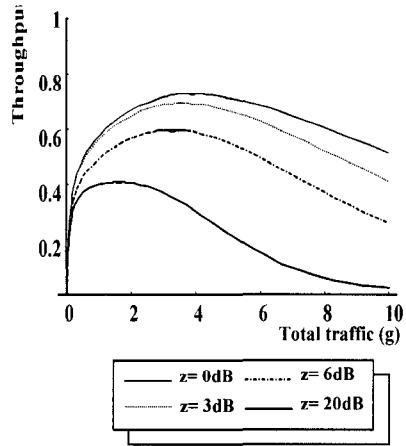


그림 4. 페이딩만 존재하는 환경에서 포획을 고려한 CSMA/CD의 효율

Fig. 4. Performance of CSMA/CD with capture over fading channel.

그림 5는 원근효과와 페이딩현상이 존재하는 채널에서 포획을 고려한 CSMA/CD의 효율이다. 그림에서 보면 최대효율에서 임계값  $z$ 값이 3dB 증가할 때마다 효율이 약 6%씩 감소함을 알 수 있다. 그러나 트래픽이 증가해도 효율은 감소하지 않는다. 그리고 그림 4의 결과와 비교해보면 임계값  $z$ 가 같을 때 최대 효율이 약 10% 이상 증가함을 알 수 있다. 이는 원근효과가 포획확률을 높여 주는 것으로 볼 수 있다. 그림 6은 그늘현상과 페

이딩이 존재하는 환경에서 CSMA/CD의 효율이다. 페이딩에 그늘현상이 중첩되므로 트래픽이 높아지면 효율이 급격히 감소한다.

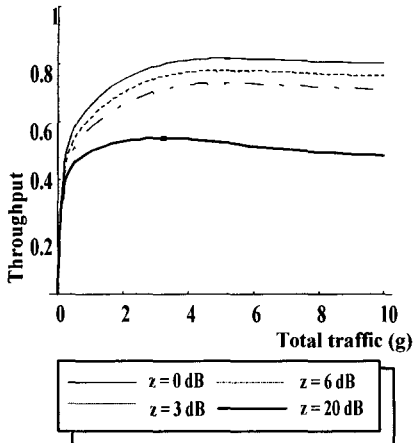


그림 5. 원근효과와 페이딩현상이 존재하는 채널에서 포획을 고려한 CSMA/CD의 효율

Fig. 5. Performance of CSMA/CD with capture over near-far effect and fading.

효율이 높아지지만 트래픽이 증가해도 효율의 감소가 적어진다. 즉, 더욱 좋은 안정성을 가지게 된다. 임계값  $z$ 가 작을수록 잡음이 큰 조건에서도 신호를 포획할 수 있는 확률이 커지기 때문에 작은  $z$ 값에서 더 우수한 효율을 가짐을 알 수 있다. 위의 그림에서 보면  $z$ 값이 6dB 정도 이면 시스템의 성능에 대한 신뢰성은 좋다고 볼 수 있다. 또한 위의 결과를 보면 페이딩환경만 고려한 모델보다 채널 특성을 많이 고려할수록 효율이 좋아지는데 특히 포획 확률을 높이는 채널 특성이 원근효과임을 알 수 있다.

그림 7은 레일리 페이딩과 원근효과를 고려한 채널 환경에서  $z = 0$  dB 일때 CSMA와 CDMA/CD의 효율을 비교한 것이다. 그림에서 보면 최대 효율은 CSMA와 CSMA/CD가 별다른 차이가 없다. 이는 CSMA/CD가 CSMA에 비해 좋은 성능을 유지할 수 있는 것이 충돌이 일어난 경우에 충돌로 인해 소비하는 시간을 줄이는 것에 의한 것인데 트래픽이 적을 때 충돌이 발생하면 포획에 의해 전송이 성공할 수 있는 확률이 높기 때문에 CSMA의 경우에도 좋은 채널 효율을 보일 수 있기 때문이다. 그러나 트래픽이 많아지면 포획할 수 있는 확률이 줄어들기 때문에 CSMA의 효율은 감소한다. 그러나 CSMA/CD의 경우에는 트래픽이 많은 경우에도 충돌에 의해 소비하는 시간이 CSMA의 경우보다 작기 때문에 트래픽이 많을수록 CSMA에 비해 효율이 좋음을 알 수 있다.

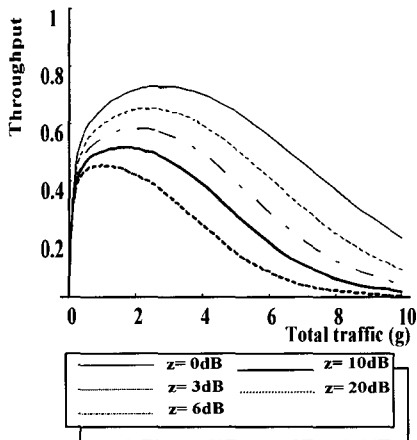


그림 6. 그늘현상과 페이딩이 존재하는 환경에서 CSMA/CD의 효율

Fig. 6. Performance of CSMA/CD with capture over scattering and fading channel.

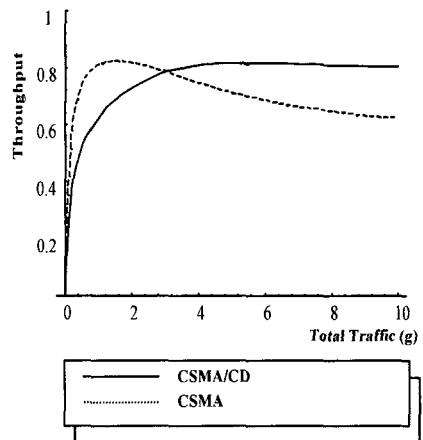


그림 7. 원근효과와 페이딩을 고려한 채널환경에서 CSMA와 CSMA/CD의 채널 효율 비교

Fig. 7. Comparison of channel throughput between CSMA and CSMA/CD with near-far effect and fading.

그림 4, 5, 6에서 보면 채널 특성을 많이 고려할수록



#### IV. 결 론

본 논문에서는 무선 환경을 다중 경로 페이딩, 그늘현상, 원근효과를 포함하는 채널로 모델링하고 다원 접속 프로토콜로써 CSMA/CD를 사용했을 때 전송 오류로 인해 시스템의 성능이 저하됨을 보였다. 전파 특성에 따른 신호 전력의 불규칙성을 이용한 포획기술을 CSMA/CD 프로토콜에 적용시켜 마르코프(Markov) 모델링을 이용하여 성능을 분석하였다. 원근효과와 페이딩현상이 존재하는 채널환경에서 포획을 고려한 CSMA/CD의 패킷 전송효율은 순수 페이딩만 존재하는 환경에서의 최대효율보다 약 10% 이상이 증가하였다. 이는 원근효과가 포획확률을 높여주는 것으로 볼 수 있다.

본 논문에서는 CSMA/CD 프로토콜을 무선환경에서 평가하였으나, 현재 IEEE 802.11의 표준인 무선 LAN에서 적용되고 있는 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)를 무선환경에서의 해석과 비교연구가 필요하다.

#### 참 고 문 헌

[1] A. S. Acampora and J. H. Winters, "A wireless network for wideband indoor communications", IEEE Trans. veh. Technol. vol. VT-36, pp.19-27, Feb. 1987.

[2] 노준철 김동인, "무선 데이터통신 시스템을 위한 다원접속 기술", 전자공학회지, vol.21, No.7, pp.27-35, July 1994.

[3] Kwang-Cheng Chen, "Medium Access Control of Wireless LANs for Mobile Computing", IEEE Network, pp.50-63, Sep/Oct, 1994.

[4] Leonard Kleinrock, Fouad A. Tobagi, "Packet Switching in Radio Channels: Part I-Carrier Sense Multiple-Access Modes and Their Throughput-Delay Characteristics", IEEE Trans. Commun., vol. COM-23, No. 12, pp.1400-1416, Dec., 1975.

[5] Fouad A. Tobagi, Leonard Kleinrock, "Packet Switching in Radio Channels: Part II-The Hidden Terminal Problem in Carrier Sense Multiple-Access and the Busy-Tone Solution", IEEE Trans. Commun., vol. COM-23, No. 12, pp.1417-1433, Dec., 1975.

[6] H. Hashemi, "The indoor radio propagation channel", Proc. IEEE, vol.81, No.7, pp.943-968, July 1993.

[7] C. van der 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.

[8] E. N. Gilbert, "Capacity of a burst-noise channel", The Bell System Technical Journal, pp. 1253-1265, Sep. 1960.

[9] N. Abramson, "The throughput of packet broadcasting channels", IEEE Trans. commun., vol. COM-25, pp. 117-128, Jan. 1977.

[10] J. C. Arnbak, W. V. Blitterswijk, "Capacity of slotted ALOHA in rayleigh-fading channels", IEEE JSAC, vol. SAC-5, No.2, pp. 261-269, Feb., 1987.

[11] Kyung S. KWAK, "Capture Statistics in Multiple Access Communication Systems", IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E75-A, No. 6, pp.701-711, June, 1992.

[12] D. Bertsekas and R. Gallager, Data Networks, Prentice-Hall International Ed. 2nd, 1992.

[13] Chiew T. Lau, Cyril Leung, "Capture Models for Mobile Packet Radio Networks", IEEE Trans. Commun., Vol. 40, No. 5, pp. 917-925, May, 1992.

[14] Hideaki Takagi, Leonard Kleinrock, "Throughput Analysis for Persistent CSMA Systems", IEEE Trans. Commun., Vol. 33, No. 7, pp. 627-638, July, 1985.

저 자 소 개

史 朱 嬭 (會員申請中)

1993년 2월 인하대학교 공과대학 전자공학과(학사). 1995년 2월 인하대학교 대학원 전자공학과(석사). 1995년 2월 - 현재 삼성전자 통신연구소 네트워크팀 연구원. 주관심분야는 데이터통신 네트워크 등임.



郭 慶 燮 (正會員)

1977년 인하대학교 전기공학(학사). 1979년 인하대학교 대학원, 전기공학(석사). 1981년 Univ. of So. California 대학원, EE (박사). 1988년 Univ. of California 대학원, 통신이론 및 시스템 (박사). 1983 - 1988년 Univ. of California, San Diego, 연구조교. 1988 - 1989년 미국 Hughes Network Systems, 연구원. 1989 - 1990년 미국 IBM, 연구원. 1990년 3월 - 현재 인하대학교 전자공학과, 부교수. 1995년 1월 - 현재 한국통신학회 상임이사. 주관심분야는 위성 및 이동통신, 데이터통신망 등임.



玄 仁 福 (會員申請中)

1996년 2월 인하대학교 공과대학 전자공학과(학사). 1996년 3월 - 현재 인하대학교 전자공학과. 주관심분야는 데이터통신 네트워크, 무선 LAN, CDMA Network 등임.