

論文97-34S-9-1

# 분산 무선 매체접근제어 프로토콜의 성능 분석 및 비교

## (Performance Analysis and Comparison of Distributed Wireless Media Access Control Protocols)

金 宰 顯 \* , 李 廷 圭 \*

(Jae Hyun Kim and Jong Kyu Lee)

### 요 약

본 논문에서는 IEEE 802.11의 무선근거리 통신망 표준 프로토콜인 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) 프로토콜의 성능을 renewal theory을 기본으로 분석하였다. CSMA/CA 프로토콜로서는 기본 CSMA/CA, Stop-and-Wait CSMA/CA 및 4-Way Handshake CSMA/CA를 고려하여 각각의 성능분석방법을 제시하였다. 우선, 성능분석을 위하여 유한 가입자 모델을 고려한 후 무한가입자 모델로 확장하였다. 또한, CSMA/CA 프로토콜은 1-persistent CSMA 모델과 p-persistent CSMA 모델의 복합적인 모델 방식을 제시하여 CSMA/CA 프로토콜의 특성을 반영하였으며, 수학적 분석은 컴퓨터 시뮬레이션을 사용하여 검증하였다. 분석결과로서는 수학적 분석과 시뮬레이션의 결과가 매우 유사하였으며, 망의 트래픽이 많은 경우 4-Way Handshake CSMA/CA 프로토콜이 상대적으로 다른 두 방식에 비하여 우수한 성능을 보이는 것을 알 수 있었다.

### Abstract

The performance of Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA) protocol adopted as a draft standard of IEEE 802.11 wireless LAN, is analyzed by using mathematical method based on renewal theory. We introduce three kinds of CSMA/CA protocols basic, stop-and-wait and 4-Way handshake CSMA/CA with their mathematical analysis. First, a network of finite population is considered and then expand to infinite population. We model the CSMA/CA protocol as a hybrid protocol of 1-persistent CSMA and p-persistent CSMA protocol, and verify analytical results by computer simulation. We have found that 4-Way Handshake CSMA/CA shows better performance than those of other two types of CSMA/CA in case of high traffic load.

### I. 서 론

무선 데이터 통신기술의 발전과 단말기의 이동성 요구가 증가하고 있는 근래에 들어서는 다양한 무선 데이터 통신 서비스들이 이루어지고 있다. 세계 각국의 통신 관련 기업체에서도 새로운 무선 통신 시스템 및 서비스에 대하여 연구 개발 중에 있다<sup>[1]</sup>. 그러나, 각

기업체에서 개발한 무선 근거리 통신망 시스템에서는 기업체 고유의 프로토콜을 사용하여, 제조회사가 다른 경우 무선 근거리 통신망 시스템간의 호환이 이루어지지 않고 있는 실정이다. 이러한 점을 고려하여 1990년에 IEEE 802.11 위원회가 발족되어 무선 근거리 통신망의 표준 프로토콜을 설정하기 위하여 연구 중에 있다<sup>[2]</sup>. 또한, 유럽의 경우에도 마찬가지로 ETSI에서 HIPERLAN이라 하여 5 GHz 또는 17 GHz 대역을 사용하는 고속 무선 근거리통신망의 연구가 활발하게 진행되고 있다<sup>[3]</sup>.

무선환경에서의 매체접근제어 프로토콜 성능분석에

\* 正會員, 漢陽大學校 電子計算學科

(Dept. of Com. Sci. Eng., Hanyang Univ.)

接受日字: 1997年2月24日, 수정완료일: 1997年6月5日

대한 연구들은 이미 활발히 이루어지고 있다 [4]-[6]. 그러나, 이러한 논문들은 모두 ALOHA 프로토콜에 관련된 것들이다. 근래에 와서는 CSMA/CA 프로토콜에 관련된 몇몇 논문들이 연구되고 있다 [7]-[9]. 그러나, 대부분의 논문들에서 CSMA/CA 프로토콜의 특성을 단순화하여 대략적인 성능을 분석하거나, 수학적 분석 방법을 제시하지 않고 있다. 본 논문에서는 IEEE 802.11에서 표준화 작업중인 CSMA/CA 방식의 기능 및 특성을 알아본 후, 이 방식의 처리율 및 패킷지연을 renewal theory를 기본으로 분석하였다.

논문의 구성은 II장에서 세가지 CSMA/CA 프로토콜의 특성을 기술하며, III장에서는 성능분석을 위하여 시스템 모델을 설정하고, IV장에서 세가지 CSMA/CA 프로토콜의 처리율을 분석하며, V장에서는 패킷지연을 분석한다. 또한, VI장에서는 수학적 분석의 결과를 다양하게 보이고, 시뮬레이션을 통하여 분석결과를 검증한다. 마지막으로, VII장에서는 결론과 향후 연구방향에 대하여 언급하였다.

## II. CSMA/CA 프로토콜

IEEE 802.11 프로토콜에서 서비스할 수 있는 형태는 contention 서비스와 contention free 서비스로 구분할 수 있으며, contention 서비스는 일반적인 컴퓨터 통신으로서 파일의 전송과 같은 비동기성 데이터의 서비스를 담당하며, DCF에 의하여 처리되고, DCF는 CSMA/CA 프로토콜을 기본으로 하고 있다. Contention free 서비스는 음성이나 화상과 같은 지연에 민감한 전송에 대한 시간제약 트래픽에 대한 서비스로서, PCF에 의하여 처리된다. IEEE 802.11의 매체접근제어 프로토콜에서는 contention 서비스와 contention free 서비스를 함께 처리할 수 있도록 설계되었다. DCF와 PCF 서비스는 세 가지 Inter Frame Space (IFS)에 의하여 구현되어지는데 다음과 같다. 우선, 길이가 가장 짧은 Short Inter Frame Space (SIFS)가 있다. SIFS는 가장 짧은 지연으로서, 가장 높은 우선 순위를 갖는 전송을 시도할 때 사용되기 때문에 시간제약을 갖는 음성, 화상 등의 데이터 전송시 사용되고, 중간길이의 Point coordination function Inter Frame Space (PIFS)는 시간 제약 서비스에서 스테이션의 polling시에 사용된다. 또한, Distributed coordination function Inter Frame

Space (DIFS)는 가장 긴 IFS로서 가장 낮은 우선 순위를 가지므로, contention 서비스에서 사용된다.

무선통신에서는 기존의 유선방식에 비하여 전송시 어려움이 증가하며, 유선에서는 고려되지 않았던 여러 잡음들이 존재하여 올바른 패킷의 전송을 방해한다. 이러한 문제를 극복하기 위한 방법으로서 IEEE 802.11 CSMA/CA 프로토콜에서는 다양한 패킷 재전송 방식을 제공하고 있다. 그 예로, 기본적으로 데이터만을 보내는 Basic CSMA/CA 프로토콜, 데이터와 positive acknowledgment (ACK) 패킷을 전송하는 Stop-and-Wait Automatic Repeat Request Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (SW ARQ 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. 각 방식의 데이터 전송 순서를 보면 다음과 같다 [2]. 1) Basic CSMA/CA : DATA - DATA - ..., 2) SW ARQ CSMA/CA : DATA - ACK - DATA - ACK - ..., 3) 4-WH CSMA/CA : RTS - CTS - DATA - ACK - ... . 본 논문에서는 이러한 세가지 CSMA/CA 프로토콜에 대하여 각각 처리율과 패킷지연을 분석한다.

## III. 성능분석모델

성능분석 모델로서 채널이 시간축에 대하여 나누어진 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. 슬롯화된 모델로서, 시간축은 슬롯 크기인  $a$ 로 나누어 있다고 가정하였으며, 각 스테이션은 슬롯의 시작점에서만 전송이 가능하도록 동기화되어 있다고 가정하였다. 트래픽 모델은 유한 가입자 모델로 설정하여  $M$ 개의 스테이션으로 구성된 통신망으로 설정하였으며, 확장된 모델로서 무한 가입자 모델도 고려

하였다. 한 스테이션에서 새로운 패킷이 발생할 확률은 geometric분포를 따르는  $g$ 라고 가정하고,  $1-g$ 의 확률로 패킷을 발생하지 않는다 ( $0 < g < 1$ )<sup>[10], [11]</sup>. 또한, CSMA/CA 프로토콜의 경우, 한 스테이션은 확률  $p$ 로 버퍼 내의 패킷에 대하여 한 슬롯 동안 전송을 시도하며,  $1-p$  확률로 전송을 하지 않는다 ( $0 < p \leq 1$ ).

채널 모델은 noiseless 채널로 가정하여 전송 중의 에러는 패킷간의 충돌에 의한 에러에 비하여 크지 않다고 가정하였다. 또한, 각 스테이션의 전파지연은 각각 동일하다고 가정하였다. 또한, 각 스테이션의 모델로서 non-capture effect를 가정하였으며, 각 스테이션은 슬롯의 시작점에서 패킷전송을 시도하도록 동기화되어 있다고 가정하였다. 패킷의 길이는 분석을 용이하게 하기 위하여 실제 패킷을 전송하는 시간인 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 스테이션이 하나도 없는 상태이며,  $B$ 는 busy 상태로 1개 이상의 스테이션이 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<sup>[12], [13]</sup>.

#### IV. 처리율 분석

##### 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. Basic CSMA/CA 프로토콜의 채널 모델은 그림1 과 같이 나타낼 수 있다. 그림 1에서 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. 실제 전송시간  $T^{(j)}=1+a$  (전송에 성공하거나 또

는 실패) 이므로 busy 기간은 식 (1)과 같다. 또한, 세가지 CSMA/CA 프로토콜 분석과정의 이해를 돕기 위하여 패킷 전송기간은  $TP$ 라고 정의한다. 각 busy 기간내의 sub-busy 기간의 수를  $J$  라고 정의하면  $B$ 와  $U$ 를 쉽게 구할 수 있다.

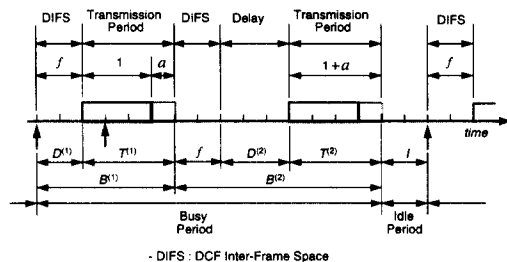


그림 1. Basic CSMA/CA 의 채널모델  
Fig. 1. Channel model in the Basic CSMA/CA.

$$B = \sum_{j=1}^J B^{(j)} \quad , \quad U = \sum_{j=1}^J U^{(j)} \quad (1)$$

이때, sub-busy기간은 바로 이전의 sub-busy 기간 내에 패킷이 발생하게 되면 지속적으로 연속되기 때문에 평균  $J$ 는 다음과 같다.

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

$$\bar{J} = \frac{1}{(1-g)^{(TP/a)M}} \quad ; \quad j = 1, 2, \dots \quad (2)$$

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

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

$$\bar{U} = E[U^{(1)}] + (\bar{J} - 1)E[U^{(2)}] \quad (3)$$

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

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

$$\bar{I} = \frac{a}{[1 - (1-g)^M]} \quad ; \quad k = 1, 2, \dots \quad (4)$$

이 된다. 여기서 평균  $D^{(j)}$ 와 평균  $U^{(j)}$ 를 구하기 위하여  $P_n(X)$ 을  $X$  slot동안  $M$  사용자 중  $n$ 개의 패킷이 발생할 확률이라고 정의하면,

$$P_n(X) = \frac{\binom{M}{n} [1 - (1-g)^X]^n (1-g)^{X(M-n)}}{1 - (1-g)^{XM}} \quad (5)$$

;  $n = 1, 2, \dots, M.$

이고, 또한,  $N_0^{(j)}$  을 패킷전송 기간이 끝날 때의 전송을 대기중인 패킷의 수로 정의하면,

$$\text{Prob}[N_0^{(j)} = n] = P_n(TP/a) \quad j = 2, 3, \dots \quad (6)$$

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

$$\text{Prob}[D^{(j)} \geq ka | N_0^{(j)} = n] = (1-p)^{kn} (1-g)^{k(M-n)} \quad (7)$$

식 (7)에서  $k$ 와  $N_0^{(j)}$ 의 모든 경우에 대하여 고려하여  $D^{(j)}$ 를 구하면

$$E[D^{(j)}] = \begin{cases} \frac{f[1 - (1-g)^M]}{1 - (1-g)^{(TP/a)M}} \left( \sum_{k=1}^{\infty} ((1-p)^k - (1-g)^{(TP/a)k}) \right) & ; j=1 \\ \frac{f[1 - (1-g)^M]}{[(1-p)^k - (1-g)^k] M (1-g)^{(TP/a)M} \sum_{k=1}^{\infty} (1-g)^{kM}} & ; j=2, 3, \dots \end{cases} \quad (8)$$

이고, 식 (3), (4), (7), (8)을 이용하면 다음과 같이 평균 idle 기간과 평균 busy 기간의 합을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{B} + \bar{T} &= f[1 - (1-g)^M] + 1 + a \\ &= \frac{1}{(1-g)^{(TP/a)M}} \left( (f+1+a)[1 - (1-g)^{(TP/a)M}] \right. \\ &\quad \left. + a \sum_{k=1}^{\infty} ((1-p)^k - (1-g)^{(TP/a)k}) [(1-p)^k - (1-g)^k] \right)^M \\ &\quad - a(1-g)^{(TP/a)M} \sum_{k=1}^{\infty} (1-g)^{kM} \Big) + \frac{a}{1 - (1-g)^M} \end{aligned} \quad (9)$$

다음으로 평균  $U^{(j)}$ 를 구한다. 우선,  $N_0^{(j)} = n$  이고  $D^{(j)} \geq ka$  일 때의  $U^{(j)}$ 를 구하면

$$E[U^{(j)} | D^{(j)} \geq ka, N_0^{(j)} = n] = \begin{cases} np(1-p)^{n-1} & ; k=0 \\ \left[ \frac{np(1-p)^{n-1}(1-g)^{(M-n)} + (1-p)^n (M-n)g(1-g)^{(M-n)-1}}{(1-p)^n (M-n)g(1-g)^{(M-n)-1}} \right] & ; k>0 \end{cases} \quad (10)$$

이 되고, 여기서 평균  $U$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{U} &= E[U^{(1)}] + (\bar{J} - 1)E[U^{(2)}] \\ &= \frac{Mg(1-g)^{M-1}}{1 - (1-g)^M} + \frac{1}{(1-g)^{(TP/a)M}} \\ &\quad \cdot \sum_{n=1}^M \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} [np(1-p)^{(k+1)n-1} (1-g)^{(k+1)(M-n)} \right. \\ &\quad \left. + (M-n)(1-p)^{(k+1)n}g(1-g)^{(k+1)(M-n)-1}] + np(1-p)^n \right. \\ &\quad \left. \cdot \left\{ \binom{M}{n} [1 - (1-g)^{(TP/a)M}]^n (1-g)^{(TP/a)(M-n)} \right\} \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

식 (9) 와 식 (11)을 이용하면 slotted Basic CSMA/CA 프로토콜의 처리율을 구할 수 있다. 이제 유한 가입자 모델을 무한가입자 모델로 확장하여 처리율을 분석하기 위하여  $G$ 를 Poisson분포의 트래픽양이라고 정의하면  $Mg = aG$  가 되고, 식 (9)와 (11)을 무한 가입자 모델로 확장하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{B} + \bar{T} &= E[B^{(1)}] + (\bar{J} - 1)E[B^{(2)}] + \bar{T} \\ &= f[1 - e^{-\alpha}] + 1 + a + \left( \frac{1}{e^{-\frac{1}{TPG}} - 1} \right) \\ &\quad \cdot \left[ f + \frac{ae^{-\alpha(1+TP)}}{1 - e^{-\alpha TP}} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{[(1-p)gTP]^n}{[1 - (1-p)^n] e^{-\alpha n}} \right) + 1 + a \right] \\ &\quad + \frac{a}{1 - e^{-\alpha}} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \bar{U} &= E[U^{(1)}] + (\bar{J} - 1)E[U^{(2)}] \\ &= \frac{aGe^{-\alpha}}{1 - e^{-\alpha}} + \left( \frac{1}{e^{-\frac{1}{TPG}} - 1} \right) \\ &\quad \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{[np + (1-p)g][e^{-\alpha}(1-p)^n]^2}{(1-p)[1 - e^{-\alpha}(1-p)^n]} + np(1-p)^{n-1} \right\} \\ &\quad \cdot \left\{ \frac{e^{-\alpha TP} [TPG]^n}{[1 - e^{-\alpha TP}] n!} \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

무한 가입자 모델에서의 CSMA/CA 프로토콜의 처리율은 유한가입자 모델과 동일한 방법을 사용하여 전체 사이클 기간 중 실제 전송에 성공하는 평균기간의 비로 구할 수 있다. 분석의 신뢰성을 확인하기 위하여  $p=1$  이고  $f=0$  를 식 (12)와 (13)에 대입하여 1-persistent CSMA 프로토콜의 처리율을 구하면 식 (14)와 같이 Kleinrock의 분석결과와 동일한 결과값을 얻을 수 있다 [8].

$$\bar{S} = \frac{Ge^{-G(1+a)}[1 + a - e^{-aG}]}{(1+a)(1 - e^{-aG}) + ae^{-G(1+a)}} \quad (14)$$

## 2. Stop-and-Wait ARQ CSMA/CA

SW ARQ CSMA/CA 프로토콜의 처리율 분석은 Basic CSMA/CA을 이용하여 구할 수 있다. 우선 SW ARQ CSMA/CA 프로토콜의 분석에서 사용한 채널 특성 모델은 그림 2와 같다.

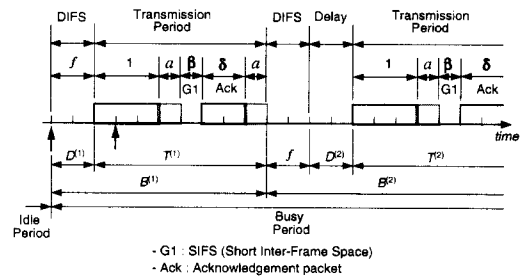


그림 2. SW ARQ CSMA/CA의 채널모델  
Fig. 2. Channel model in the SW ARQ CSMA/CA.

여기서 사용된 모든 정의와 가정은 Basic CSMA/CA의 처리를 분석시 사용한 것과 동일하다. 그러나 패킷전송 기간  $TP$ 의 경우는 전송에 성공할 때의 전송기간인  $TP_S (1 + \beta + \gamma + 2a)$ 와 전송에 실패할 때의 전송기간인  $TP_F(1+a)$ 와 구분하여 계산해주어야 한다.  $j$ 번째 sub-busy기간은 ( $j-1$ )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.

$$\begin{aligned}
 B(TP) &= f + d(TP) \\
 &+ \{ (TP_S + [1 - (1-g)^{TP_S/a}] B(TP_S/a) ) u(TP) \\
 &+ \{ TP_F + [1 - (1-g)^{TP_F/a}] B(TP_F/a) \} [1 - u(TP)] \}
 \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned}
 U(TP) &= \{ 1 + [1 - (1-g)^{TP_S/a}] U(TP_S/a) \} u(TP) \\
 &+ \{ [1 - (1-g)^{TP_F/a}] U(TP_F/a) \} [1 - u(TP)]
 \end{aligned} \tag{16}$$

여기서,  $d(TP)$ 와  $u(TP)$ 는 식 (8)과 (11)을 이용하여 구한다. 또한, busy 기간은  $B^{(1)}$ 에서 시작하여 연속되므로 평균 busy 기간은  $B(1)$ 에 의하여 구할 수 있으며, 평균 전송에 성공하는 기간도 마찬가지로 구할 수 있다.

$$\bar{B} = B(1); \quad \bar{U} = U(1) \tag{17}$$

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. 식 (15) 및 (16)의  $TP$ 를  $TP_S$ 와  $TP_F$ 로 대입하면 각각 두 개의 이원일차 연립방정식을 구할 수 있으며, 그 해는 간단한 계산으로 구할 수 있다. 이렇게 해서 구한 값들을 이용하여 다음과 같이 SW ARQ CSMA/CA 프로토콜의 처리율을 구한다.

$$S = \frac{U(1)}{B(1) + \frac{a}{[1 - (1-g)^M]}} \tag{18}$$

무한가입자 모델에서의 처리율 분석은 Basic CSMA/CA 프로토콜의 경우와 유사한 방법으로 구할 수 있다.

### 3. 4-Way Handshake CSMA/CA

4-WH CSMA/CA 프로토콜은 패킷전송 이전에 RTS 패킷과 CTS 패킷을 송수신하여 채널사용을 예약하는 방식으로, 채널 모델은 그림 3과 같다. 이때, RTS 패킷의 길이는  $\gamma$ 로 정의하고 CTS 패킷의 길이는  $\theta$ 로 정의하며, SIFS의 길이는  $\beta$ 로 정의한다.

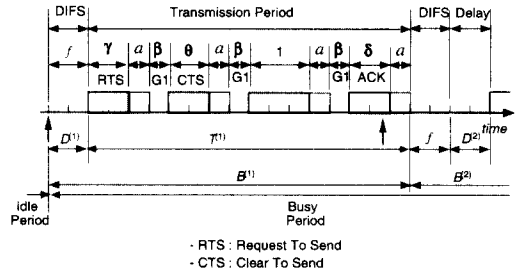


그림 3. 4-WH CSMA/CA의 채널 모델  
Fig. 3. Channel model in 4-WH CSMA/CA.

만약, RTS 패킷의 전송에 성공하면, 패킷전송 기간  $T^{(j)}$ 을  $TP_{4S}$ 라고 정의하면 이때의 기간은  $(1 + \gamma + \delta + 3\beta + 4a)$ 가 되며, RTS 패킷의 전송시 충돌이 발생하는 경우의  $T^{(j)}$ 를  $TP_{4F}$ 라고 정의하면 이때의 기간은  $(\gamma + a)$ 가 된다.

4-WH CSMA/CA 프로토콜의 처리율 분석의 방법은 SW ARQ CSMA/CA 프로토콜의 분석과 매우 동일하며, 이때  $TP_S$ 를  $TP_{4S}$ 로  $TP_F$ 를  $TP_{4F}$ 로 바꾸어 계산하여 처리율을 구할 수 있다.

## V. 패킷지연 분석

### 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, 임의의 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  $T/(B+T)$ 가 되며, 2)의 경우에 대한 평균기간도 DIFS이며, 이때의 확률은  $\bar{D}/(\bar{B}+T)$ 이며, 마지막으로 3)의 경우에 대한 평균기간은 남아있는 패킷 전송기간과 backoff 지연기간이며, 이러한 사건이 발생할 확률은  $(\bar{B}-\bar{D})/(\bar{B}+T)$ 가 되며, 남아있는 전송기간은 renewal theory의 residual life 계산에 의하여 구할 수 있다<sup>[13]</sup>. 이러한 점들을 고려하여 임의의 한 패킷에서의 평균 지연기간  $R$ 을 구하면 다음과 같다.

$$\bar{R} = \bar{I} \frac{f}{\bar{B}+I} + \bar{D} \frac{f}{\bar{B}+I} + \frac{\bar{B}-\bar{D}}{\bar{B}+I} \left[ \frac{(\bar{B}+E[D])^2}{2(\bar{B}+E[D])} \right] \quad (19)$$

이때, 식 (21)에서  $E[D]$ 는 식 (8)을 이용하여 구하며,  $\bar{D}$ 은 다음의 식 (20)과 같이 구한다.

$$\bar{D} = E[D^{(1)}] + (\bar{J} - 1)E[D^{(2)}] \quad (20)$$

결국 Basic CSMA/CA의 패킷지연을 구하면 식 (21)과 같다.

$$L = \left( \frac{G}{S} - 1 \right) [TP + \bar{Y} + \bar{R}] + TP + \bar{R} \quad (21)$$

여기서,  $Y$ 는 재전송을 시도하는 패킷의 평균 랜덤 지연시간이며,  $TP$ 는 패킷전송 기간  $(1+a)$ 이다. 또한, 무한가입자 모델의 경우에는 각각 식에서 geometric 분포를 Poisson 분포로 대체하여 쉽게 구할 수 있다. 무한 가입자 모델의 분석결과는 식 (19)와 다음의 수식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} E[D] &= \frac{ae^{-aG(1+TP)}}{1-e^{-aGTP}} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{[(1-\rho)aGTP]^n}{[1-(1-\rho)^n e^{-aG}]n!} \right) \\ \bar{D} &= E[D^{(1)}] + (\bar{J}-1)E[D^{(2)}] \\ &= f[1-e^{-aG}] + \left( \frac{1}{e^{-TPG}} - 1 \right) \left[ \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{[(1-\rho)aGTP]^n}{[1-(1-\rho)^n e^{-aG}]n!} \right) \right] \end{aligned} \quad (22)$$

## 2. Stop-and-Wait ARQ CSMA/CA

SW ARQ CSMA/CA 프로토콜의 패킷지연은 Basic CSMA/CA의 패킷지연 계산과 유사한 방법으로 구할 수 있다. 우선  $\bar{R}$ 를 구해보면,

$$\bar{R} = \frac{\bar{I}}{\bar{B}+I} f + \frac{\bar{D}}{\bar{B}+I} f + \frac{\bar{B}-\bar{D}}{\bar{B}+I} \left\{ P_{Succ} \left[ \frac{(\bar{B}+d(TP_S/a))^2}{2[\bar{B}+d(TP_S/a)]} \right] + P_{Fail} \left[ \frac{(\bar{B}+d(TP_F/a))^2}{2[\bar{B}+d(TP_F/a)]} \right] \right\} \quad (23)$$

이 된다. 이 때,  $TP_S$ 는  $1+\beta+\gamma+2a$  이고,  $TP_F$ 는  $\gamma$

$+a$  이다.  $P_{Succ}$ 는 평균 패킷전송에 성공할 확률로서  $(G/S)$ 이며,  $P_{Fail}$ 는 평균 패킷전송에 실패할 확률로서  $1-P_{Succ}$ 가 된다. 평균 지연기간인  $\bar{D}$ 는 Basic CSMA/CA의 경우와 다르게 구해야 한다.

$$\begin{aligned} \bar{D} &= f + \{ d(TP_S/a) + [1-(1-g)^{(TP_S/a)}] D(TP_S/a) \} u(1) \\ &\quad + \{ d(TP_F/a) + [1-(1-g)^{(TP_F/a)}] D(TP_F/a) \} [1-u(1)] \end{aligned} \quad (24)$$

여기서,  $d(TP_S/a)$ 와  $d(TP_F/a)$ 는 식 (8)에서  $TP$ 대신  $TP_S$ 와  $TP_F$ 를 대입하여 구하며,  $D(TP_S/a)$ 와  $D(TP_F/a)$ 는  $TP_S$ 와  $TP_F$ 에 각각 1을 대입하여 구할 수 있다. 결국 SW CSMA/CA의 패킷지연을 구하면 다음과 같다.

$$L = \left( \frac{G}{S} - 1 \right) [TP_F + \bar{Y} + \bar{R}] + TP_S + \bar{R} \quad (25)$$

## 3. 4-Way Handshake CSMA/CA

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

$$\begin{aligned} \bar{R} &= \frac{\bar{I}}{\bar{B}+I} f + \frac{\bar{D}}{\bar{B}+I} f \\ &\quad + \frac{\bar{B}-\bar{D}}{\bar{B}+I} \left\{ P_{Succ} \left[ \frac{[\bar{B}+d(TP_{4S}/a)]^2}{2[\bar{B}+d(TP_{4S}/a)]} \right] \right. \\ &\quad \left. + P_{Fail} \left[ \frac{[\bar{B}+d(TP_{4F}/a)]^2}{2[\bar{B}+d(TP_{4F}/a)]} \right] \right\} \end{aligned} \quad (26)$$

가 된다.  $\bar{D}$ 를 구하는 방법도 SW CSMA/CA 방식과 동일하며 이때, 식 (23)에서  $TP_S$  대신  $TP_{4S}$ 를 대입하고,  $TP_F$  대신  $TP_{4F}$ 를 대입하여 계산하여 구한다. 또한 정규화된 패킷지연  $L$ 도 마찬가지로 식 (24)를 이용하여 구할 수 있으며, 무한 가입자 모델의 경우는 geometric 분포를 Poisson 분포로 대체하여 계산만 다시 하면 구할 수 있다.

## VI. 성능분석 및 시뮬레이션

본 절에서는 CSMA/CA 프로토콜의 처리율 및 패킷지연 분석 결과 값들과 컴퓨터 시뮬레이션 결과 값들을 비교한다. 컴퓨터 시뮬레이션은 실제 무선 근거리 통신망 환경을 가정하여 수행하였으며, 기본 파라미터 설정은 IEEE 802.11 표준안을 근거로 하였다<sup>[2]</sup>. 사

용된 파라미터들은 사용자 수인  $M$ , 트래픽양인  $g$ , ACK 패킷 전송시간인  $\delta$ , RTS 패킷 전송시간인  $\gamma$ , CTS 패킷 전송시간인  $\theta$ , SIFS 길이인  $\beta$ , DIFS 길이인  $f$ , 패킷전송 확률인  $p$ 를 사용하였다.

컴퓨터 시뮬레이션 언어로서는 사전유도 방식과 프로세스 접근 방식을 제공하는 SIMSCRIPT II.5를 사용하였으며, 시뮬레이션의 결과 값은 패킷이 1000개 서비스 될 때마다 검사하며, 처리율과 패킷지연의 값

을 그 이전의 검사 시점과 비교하여 그 차이값이  $10^{-3}$  이하가 되는 경우 종료하도록 하였다. 또한, 각 터미널 들은 모두 동일하게 동작하는 것으로 모델하였다.

세가지 CSMA/CA 프로토콜의 성능을 비교 분석하기 위하여 그림 4와 5에서는 각각의 처리율과 패킷지연의 분석 결과값들을 비교하였다. 이때, 선으로 표시된 것은 수학적인 분석 결과이며, 다각형으로 표시된 것들은 컴퓨터 시뮬레이션의 결과값들이다. 그림 4 와

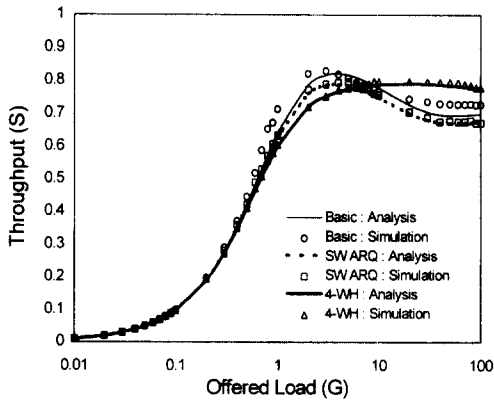


그림 4. 유한가입자 모델에서 세가지 CSMA/CA 프로토콜의 처리율 비교

Fig. 4. Throughput comparison of three type of CSMA/CA protocols in the finite population model ( $a = 0.01, p = 0.03, f = 0.03, \gamma = 0.05, \beta = 0.01, \delta = 0.03, \theta = 0.03, M = 20$ ).

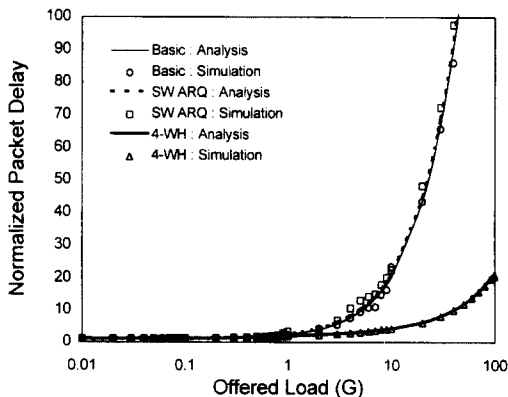


그림 5. 유한가입자 모델에서 세가지 CSMA/CA 프로토콜의 패킷지연 비교

Fig. 5. Packet delay comparison of three type of CSMA/CA protocols in the finite population model ( $a = 0.01, p = 0.03, f = 0.03, \gamma = 0.05, \beta = 0.01, \delta = 0.03, \theta = 0.03, Y = 0.06, M = 20$ ).

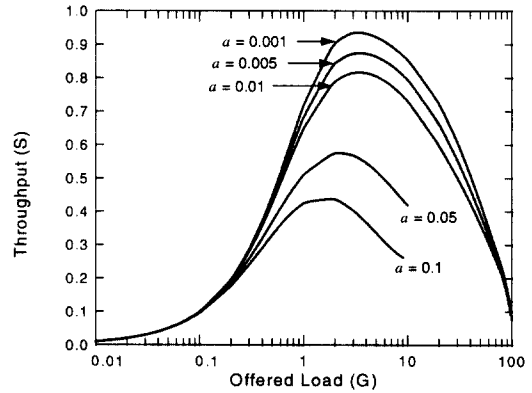


그림 6. 무한가입자모델에서의  $a$ 값의 변화에 따른 CSMA/CA의 처리율

Fig. 6. Throughput of CSMA/CA for varying  $a$  value in infinite population model ( $p=0.03, f=0.03$ ).

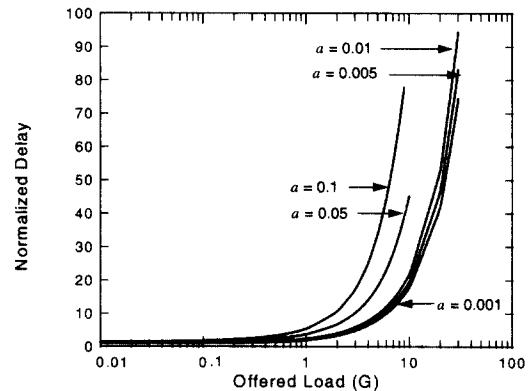


그림 7. 무한가입자 모델에서의  $a$ 값의 변화에 따른 Basic CSMA/CA의 패킷지연

Fig. 7. Packet delay of Basic CSMA/CA for varying  $a$  value in infinite population model ( $p=0.03, f=0.03$ ).

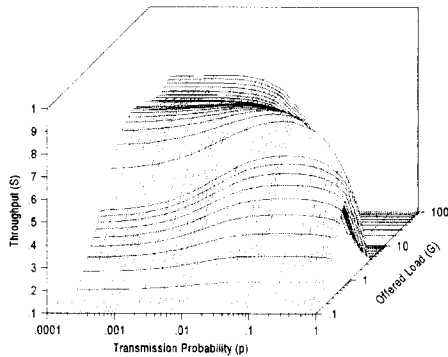


그림 8.  $p$ 값의 변화에 대한 Stop-and-Wait ARQ CSMA/CA의 처리율

Fig. 8. Throughput of Stop-and-Wait ARQ CSMA/CA for varying the  $p$  ( $a = 0.01$ ,  $f = 0.03$ ,  $\beta = 0.01$ ,  $\delta = 0.03$ ).

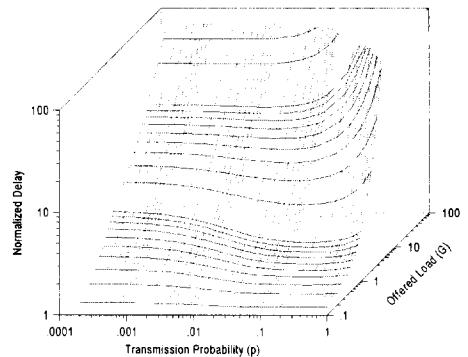


그림 9.  $p$ 값의 변화에 대한 Stop-and-Wait ARQ CSMA/CA의 패키지연

Fig. 9. Packet delay of Stop-and-Wait ARQ CSMA/CA for varying the  $p$  ( $a = 0.01$ ,  $f = 0.03$ ,  $\beta = 0.01$ ,  $\delta = 0.03$ ).

5에서 볼 수 있듯이 트래픽양( $G$ )이 10 이상인 경우 4-WH CSMA/CA 프로토콜이 다른 두 프로토콜에 비하여 상대적으로 처리율과 패키지연의 관점에서 우수한 성능을 보이고 있다. 특히, 패키지연의 경우 4-WH CSMA/CA 프로토콜이 월등하게 우수한 특성을 보이고 있다. 또한, 컴퓨터 시뮬레이션과 수학적 분석의 결과값들이 매우 유사한 형태를 보이므로, 본 수학적 분석의 방법의 신뢰성을 검증할 수 있었다.

그림 6과 7은 무한 가입자 모델에서의 Basic CSMA/CA 프로토콜의 슬롯크기( $a$ )에 따른 처리율과 패키지연의 수학적 분석결과들을 보이고 있다. 그림 6에서 보듯이 채널 처리율은 슬롯크기의 증가에 대하여 지속적으로 감소하며, 그림 7에서의 패키지연도 마찬가지로 슬롯크기의 증가에 대하여 패키지연이 지속적으로 증가하는 것을 볼 수 있었다. 그림 8과 그림9는 SW CSMA/CA 프로토콜의 성능분석 결과를 보이는 그래프로서, 패키지연 확률  $p$ 의 특성에 따른 처리율과 패키지연을 보이고 있다. 트래픽양이 0.1에서 4사이이고,  $p$ 가 0.03에서 0.07사이에서 처리율과 패키지연 특성이 상대적으로 우수한 것을 볼 수 있었다.

## VII. 결 론

본 논문에서는 무선 근거리 통신망에서의 매체접근 제어 프로토콜로서 CSMA/CA 프로토콜의 성능을 분

석하였으며, 컴퓨터 시뮬레이션으로 분석 방식의 신뢰성을 검증하였다. 성능분석 모델로서는 유한 가입자 모델과 이를 확장한 무한 가입자 모델에 대하여 고려하였고, CSMA/CA 프로토콜의 다양한 변형인 Basic CSMA/CA, SW CSMA/CA 및 4-WH CSMA/CA에 대하여 처리율과 패키지연 분석방법을 제시하였다.

분석결과로서, 트래픽양이 많은 경우, 4-WH CSMA/CA 프로토콜이 상대적으로 다른 두 프로토콜에 비하여 우수한 성능을 보이는 것을 알 수 있었으며, 슬롯크기가 증가함에 따라 성능이 지속적으로 감소한다는 것을 알 수 있었다. 또한, 패키지연 확률을 크게 설정한다고 하여 망의 성능이 지속적으로 향상되지 않으며, 특정한 범위에서 망의 성능을 최대화할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 무선 근거리 통신망의 경우에는 유선 통신 시스템에 비하여 전송에러가 증가하게 되어 상대적으로 트래픽양이 증가하게 되므로 4-WH CSMA/CA 프로토콜의 적용이 좀더 적합할 것으로 예상된다. 본 연구에서는 각 프로토콜의 성능 분석 방식의 제안 및 성능 비교에 의미가 있다고 고려되며, 향후 무선 환경에서의 다양한 에러 채널환경에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다.



부 록

A. 무한가입자 모델에서의 SW CSMA/CA 분석

A.1. 처리율분석

무한가입자 모델의 분석은 유한가입자 분석을 사용하여 구할 수 있다. 우선 유한가입자 모델의 분석중 식 (15), (16)을 다음과 같이 유한가입자 모델로 변환할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{B} &= B(1) \\ &= d(1) + \{ TP_S + [1 - e^{-G TP_S}] B(TP_S) \} u(1) \quad (A.1) \\ &\quad + \{ TP_F + [1 - e^{-G TP_F}] B(TP_F) \} [1 - u(1)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{U} &= U(1) \\ &= \{ 1 + [1 - e^{-G TP_S}] U(TP_S) \} u(1) \quad (A.2) \\ &\quad + \{ [1 - e^{-G TP_F}] U(TP_F) \} [1 - u(1)] \end{aligned}$$

여기서, 식(A.1) 과 식(A.2)의 각 구성요소를 세부적으로 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} B(TP_S) &= \frac{\left[ \begin{array}{l} [1 - e^{-G TP_F}] [TP_S + f + d(TP_S)] u(TP_F) \\ - \{ [1 - e^{-G TP_F}] [TP_S + f + d(TP_F)] - a - \beta - \delta \} \\ \cdot u(TP_S) + d(TP_S) + [1 - e^{-G TP_F}] \\ \cdot [d(TP_F) - d(TP_S)] + f + 1 + a \end{array} \right]}{\left[ \begin{array}{l} e^{-G TP_F} \{ 1 - [1 - e^{-G TP_S}] u(TP_S) \} + [1 - e^{-G TP_F}] \\ \cdot e^{-G TP_S} u(TP_F) \end{array} \right]} \quad (A.3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B(TP_F) &= \frac{\left[ \begin{array}{l} (1 + a + f) \{ [1 - e^{-G TP_S}] [u(TP_F) - u(TP_S)] + 1 \} \\ - [1 - e^{-G TP_S}] [u(TP_S) d(TP_F) - u(TP_F) d(TP_S)] \\ + d(TP_F) + (a + \beta + \delta) u(TP_F) \end{array} \right]}{\left[ \begin{array}{l} e^{-G TP_F} \{ 1 - [1 - e^{-G TP_S}] u(TP_S) \} + [1 - e^{-G TP_F}] \\ \cdot e^{-G TP_S} u(TP_F) \end{array} \right]} \quad (A.4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U(TP_S) &= \frac{u(TP_S) - (1 - e^{-G TP_F}) [u(TP_S) - u(TP_F)]}{\left[ \begin{array}{l} e^{-G TP_F} \{ 1 - [1 - e^{-G TP_S}] u(TP_S) \} \\ + [1 - e^{-G TP_F}] e^{-G TP_S} u(TP_F) \end{array} \right]} \quad (A.5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U(TP_F) &= \frac{u(TP_F)}{\left[ \begin{array}{l} e^{-G TP_F} \{ 1 - [1 - e^{-G TP_S}] u(TP_S) \} \\ + [1 - e^{-G TP_F}] e^{-G TP_S} u(TP_F) \end{array} \right]} \quad (A.6) \end{aligned}$$

다음으로 식 (18)을 무한가입자 모델로 수정하고 식 (A.1)과 (A.2)를 사용하면, 무한가입자 모델에서의 SW CSMA/CA 프로토콜의 처리율을 구할 수 있다.

$$S = \frac{U(1)}{B(1) + \frac{a}{[1 - e^{-aG}]}} \quad (A.7)$$

A.2 패킷지연분석

패킷지연도 유한가입자 모델의 분석방법을 사용하는 데, 식 (24)를 무한가입자 모델에 맞도록 수정하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{D} &= f + \{ d(TP_S) + [1 - e^{-G TP_S}] D(TP_S) \} u(1) \quad (A.8) \\ &\quad + \{ d(TP_F) + [1 - e^{-G TP_F}] D(TP_F) \} [1 - u(1)] \end{aligned}$$

여기서, 유한가입자 모델의 경우와 유사한 방법으로  $D(TP_S)$ 와  $D(TP_F)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} D(TP_S) &= \frac{\left[ \begin{array}{l} (1 - e^{-G TP_F}) [f + d(TP_S)] u(TP_F) - \{ (1 - e^{-G TP_F}) \\ \cdot [f + d(TP_F)] - d(TP_S) + d(TP_F) \} u(TP_S) \\ + d(TP_F) + f \end{array} \right]}{\left[ \begin{array}{l} e^{-G TP_F} \{ 1 - [1 - e^{-G TP_S}] u(TP_S) \} + [1 - e^{-G TP_F}] \\ \cdot e^{-G TP_S} u(TP_F) \end{array} \right]} \quad (A.9) \end{aligned}$$

$$D(TP_F) = \frac{[d(TP_F) + f] \{ (1 - e^{-G TP_S}) [u(TP_F) - u(TP_S)] + 1 \} + [d(TP_S) - d(TP_F)] u(TP_F)}{e^{-G TP_F} \{ 1 - [1 - e^{-G TP_S}] u(TP_S) \} + [1 - e^{-G TP_F}] \cdot e^{-G TP_S} u(TP_F)} \quad (\text{A.10})$$

또한,  $d(*)$ 와  $u(*)$ 를 계산해 보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} d(1) &= f[1 - e^{-aG}], \\ d(TP_S) &= \left( \frac{ae^{-G(1+TP_S)}}{1 - e^{-G TP_S}} \right) \left[ \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{[(1-p)aG TP_S]^n}{[1 - (1-p)^n] e^{-aG} n!} \right) \right], \\ d(TP_F) &= \left( \frac{ae^{-G(1+TP_F)}}{1 - e^{-G TP_F}} \right) \left[ \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{[(1-p)aG TP_F]^n}{[1 - (1-p)^n] e^{-aG} n!} \right) \right] \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

$$\begin{aligned} u(1) &= \frac{aG e^{-aG}}{1 - e^{-aG}}, \\ u(TP_S) &= \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{[np + (1-p)aG] e^{-aG - (1-p)^2} + n(1-p)^n}{(1-p)[1 - e^{-aG(1-p)^2}]^2} \right\} \left\{ \frac{e^{-G TP_S (G TP_S)^n}}{(1 - e^{-G TP_S}) n!} \right\}, \\ u(TP_F) &= \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{[np + (1-p)aG] e^{-aG - (1-p)^2} + n(1-p)^n}{(1-p)[1 - e^{-aG(1-p)^2}]^2} \right\} \left\{ \frac{e^{-G TP_F (G TP_F)^n}}{(1 - e^{-G TP_F}) n!} \right\} \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

여기서, 식 (A.8)과 (23)를 이용하면 무한가입자 모델에서의 SW CSMA/CA 프로토콜의 패킷지연을 분석할 수 있다.

#### B. 무한가입자 모델에서의 4-WH CSMA/CA 분석

##### B.1 처리율 분석

4-WH CSMA/CA 프로토콜에 대한 무한 가입자 모델의 분석 방법은 SW CSMA/CA와 유사하므로 결과값들만을 보이기로 한다.

$$\begin{aligned} B(1) &= D(1) \\ &+ \{ TP_{4S} + (1 - e^{-G TP_{4S}}) B(TP_{4S}) \} u(1) \\ &+ \{ TP_{4F} + (1 - e^{-G TP_{4F}}) B(TP_{4F}) \} [1 - u(1)] \end{aligned} \quad (\text{B.1})$$

여기서,

$$\begin{aligned} B(TP_{4S}) &= \frac{(1 - e^{-G TP_{4F}}) [TP_{4S} + f + d(TP_{4S})] u(TP_{4F}) - \{ e^{-G TP_{4F}} [TP_{4S} + f + D(TP_{4F})] - (1 + \theta + \delta + 3\beta + 3a) \} u(TP_{4S}) + d(TP_{4S}) + (1 - e^{-G TP_{4F}}) [D(TP_{4F}) - d(TP_{4S})] + f + \gamma + a}{(1 - \rho)^{(TP_{4F})M} \{ 1 - [1 - e^{-G TP_{4S}}] u(TP_{4S}) \} + (1 - e^{-G TP_{4F}}) \cdot e^{-G TP_{4F}} u(TP_{4F})} \end{aligned} \quad (\text{B.2})$$

$$\begin{aligned} B(TP_{4F}) &= \frac{(TP_{4F} + f) \{ (1 - e^{-G TP_{4S}}) [u(TP_{4F}) - u(TP_{4S})] + 1 \} - (1 - e^{-G TP_{4S}}) [u(TP_{4S}) d(TP_{4F}) - u(TP_{4F}) d(TP_{4S})] + d(TP_{4F}) + (1 + \theta + \delta + 3\beta + 3a) u(TP_{4F})}{e^{-G TP_{4F}} \{ 1 - (1 - e^{-G TP_{4S}}) u(TP_{4S}) \} + (1 - e^{-G TP_{4F}}) \cdot e^{-G TP_{4S}} u(TP_{4F})} \end{aligned} \quad (\text{B.3})$$

또한,

$$\begin{aligned} U(1) &= \{ 1 + [1 - e^{-G TP_{4S}}] U(TP_{4S}) \} u(1) \\ &+ \{ (1 - e^{-G TP_{4F}}) U(TP_{4F}) \} [1 - u(1)] \end{aligned} \quad (\text{B.4})$$

이고, 여기서

$$\begin{aligned} U(TP_{4S}) &= \frac{u(TP_{4S}) - (1 - e^{-G TP_{4F}}) [u(TP_{4S}) - u(TP_{4F})]}{e^{-G TP_{4F}} \{ 1 - (1 - e^{-G TP_{4S}}) u(TP_{4S}) \} + (1 - e^{-G TP_{4F}}) e^{-G TP_{4S}} u(TP_{4F})} \end{aligned} \quad (\text{B.5})$$

$$\begin{aligned} U(TP_{4F}) &= \frac{u(TP_{4F})}{e^{-G TP_{4F}} \{ 1 - (1 - e^{-G TP_{4S}}) u(TP_{4S}) \} + (1 - e^{-G TP_{4F}}) e^{-G TP_{4S}} u(TP_{4F})} \end{aligned} \quad (\text{B.6})$$

결국 식 (B.1), (B.4)와 (A.7)을 이용하면, 무한 가입자모델에서의 4-WH CSMA/CA 에 대한 처리율을 구할 수 있다.

##### B.2 패킷지연분석

4-WH CSMA/CA 프로토콜에 대한 무한 가입자 모델의 패킷지연 분석 방법도 SW CSMA/CA와 유사하므로 결과값들만을 보이기로 한다.

$$\begin{aligned} \bar{D} &= f + \{ d(TP_{4S}) + (1 - e^{-G TP_{4S}}) D(TP_{4S}) \} u(1) \\ &+ \{ d(TP_{4F}) + [1 - e^{-G TP_{4F}}] D(TP_{4F}) \} [1 - u(1)] \end{aligned} \quad (\text{B.7})$$

또한, 식 (B.7)에서  $D$ 의 평균을 구하기 위해서는

$D(TP_{4S})$ 와  $D(TP_{4F})$ 를 이원일차 연립 방정식을 이용하여 구하게되면 다음과 같다.

$$D(TP_{4S}) = \frac{(1 - e^{-GTP_{4F}})[f + d(TP_{4S})]u(TP_{4F}) - \{(1 - e^{-GTP_{4F}})[f + d(TP_{4F})] + d(TP_{4S}/a) + d(TP_{4F})\}u(TP_{4S}) + d(TP_{4F}) + f}{e^{-GTP_{4F}}\{1 - [1 - e^{-GTP_{4S}}]u(TP_{4S})\} + [1 - e^{-GTP_{4F}}]e^{-GTP_{4S}}u(TP_{4F})} \quad (B.8)$$

$$D(TP_{4F}) = \frac{[d(TP_{4F}) + f]\{[1 - e^{-GTP_{4S}}] \cdot [u(TP_{4F}) - u(TP_{4S})] + 1\} + [d(TP_{4S}) - d(TP_{4F}) + f]u(TP_{4F})}{e^{-GTP_{4F}}\{1 - (1 - e^{-GTP_{4S}})u(TP_{4S})\} + (1 - e^{-GTP_{4F}})e^{-GTP_{4S}}u(TP_{4F})} \quad (B.9)$$

여기서,  $d(*)$ 와  $u(*)$ 항은 식 (A.11)과 (A.12)의 수식에서  $TP_S$ 와  $TP_F$ 를  $TP_{4S}$ 와  $TP_{4F}$ 로 바꾸어 계산하면 구할 수 있다.

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] 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.

[3] T. Wilkinson, T. G. C. Phipps and S. K. Barton, "A Report on HIPERLAN Standardization," *International Journal of Wireless Information Networks*, vol. 2, no. 2, pp.99-120, Apr. 1995.

[4] C. Namislo, "Analysis of Mobile Radio Slotted ALOHA Networks," *IEEE J. Select. Areas. Commun.*, vol. SAC-2, no. 4, pp. 583-588, Jul. 1984.

[5] M. Zorzi and R. R. Rao, "Capture and Retransmission Control in Mobile Radio," *IEEE J. Select. Areas. Commun.*, vol. 12, no. 8, pp. 1289-1298, Oct. 1994.

[6] 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.

[7] 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.

[8] H. S. Chhaya and S. Gupta, "Throughput and Fairness Properties of Asynchronous Data Transfer Methods in the IEEE 802.11 MAC Protocol," *Proc. IEEE PIMRC '95*, pp. 613-617, Toronto, Canada Sep. 27-29, 1995.

[9] 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.

[10] H. Takagi, L. Kleinrock, "Throughput Analysis for CSMA Systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-33, no. 7, pp. 627-638, Jul. 1985.

[11] L. Kleinrock and F. A. Tobagi, "Packet Switching in Radio Channels: Part I - Carrier Sense Multiple-Access Modes and Their Throughput-Delay Characteristics" *IEEE Trans. on Commun.*, vol. com-23, no. 12, pp. 1400-1416, Dec. 1975.

[12] E. Çinlar, *Introduction to Stochastic Processes*, Prentice-Hall Inc., 1975.

[13] L. Kleinrock, *Queueing Systems Vol. 1: Theory*, John & Sons Inc. 1975.

---

 저 자 소 개
 

---

## 金宰顯(正會員)

1969년 7월 21일생. 1991년 2월 한양대학교 전자계산학과 졸업. 1993년 2월 한양대학교 대학원 전자계산학과 석사학위 취득. 1996년 8월 한양대학교 대학원 전자계산학과 박사학위 취득. 1997년 4월 ~ 현재 UCLA 전기공학과 post doctor 연수중. 관심분야는 무선 LAN, ATM 프로토콜 성능분석, 통신망 성능분석, Queueing theory 등

## 李廷圭(正會員)

1955년 9월 24일생. 1979년 2월 한양대학교 전자공학과 졸업. 1986년 UCLA 전자공학과 석사학위 취득. 1989년 8월 UCLA 전자공학과 박사학위 취득(컴퓨터 네트워크 전공). 1979년 3월 ~ 1984년 5월 국방과학연구소 연구원. 1989년 3월 ~ 1990년 2월 삼성전자 정보통신연구소 수석 연구원. 1990년 3월 ~ 현재 한양대학교 전자계산학과 부교수. 1997년 3월 ~ 현재 한양대학교 공학기술연구소 부소장. 관심분야는 무선데이터 통신, 통신망 성능분석, 이동 및 위성 통신망 분석, Stochastic Process 등