

論文2000-37TC-02-2

# IEEE 802.11 무선 LAN의 성능분석에 관한 연구

## (A Study on The Performance Analysis of IEEE 802.11 Wireless LAN)

洪成哲\*, 裴成洙\*, 吳暎煥\*

(Sung Cheul Hong, Seong Soo Bae, and Young Hwan Oh)

### 요 약

본 논문에서는 p-persistent CSMA 방식의 IEEE 802.11 MAC 계층 프로토콜을 모델링 하였다. 그리고 renewal 이론을 적용하여 수학적으로 분석한 Basic CSMA/CA 프로토콜, CTS/RTS 프로토콜 그리고 은닉 노드를 고려한 Basic CSMA/CA 등의 성능분석모델을 제안하였다. 제안한 분석 모델을 이용하여 throughput을 구한 결과, active 노드 수가 적거나 패킷의 길이가 짧을 때는 Basic CSMA/CA 프로토콜 방식이, active 노드 수가 많거나 패킷의 길이가 길 때는 CTS/RTS 프로토콜 방식이 우수하였다. 또한 active 노드 수가 적은 경우가 많은 경우 보다 은닉 노드의 영향을 적게 받았다.

### Abstract

In this paper, IEEE 802.11 MAC layer protocol is modeled by p-persistent CSMA method. And We introduce performance analysis model based on Basic CSMA/CA protocol, CTS/RTS protocol and hidden node effect reflected Basic CSMA/CA protocol, Which is mathematically assayed by renewal theory. In this throughput, the result shown that Basic CSMA/CA protocol is profitable when the number of active node is smaller, or the length of packet is shorter, and CTS/RTS protocol is lucrative when the number of active node is larger, or the length of packet is longer. Also the result shown that hidden node less affected when the active node has small one, rather than when the active node has larger one.

### I. 서 론

최근 노트북 등의 이동 단말의 급속한 보급으로 인하여 무선 LAN의 필요성이 증대되고 있다<sup>[1][2]</sup>. 그러나 업체들간에 제품이 완벽히 호환되지 않고 있으므로 더욱 넓은 시장 확보를 위해서는 서로 호환 될 수 있는 표준안을 필요로 하게 되었고 이의 해결을 위하여 여러 표준화 기구와 학회에서 무선 LAN에 대한 표준안을

검토하였다. 무선 LAN에 대한 연구는 IEEE 802.11 과 ETSI의 HIPERLAN으로 양분되어 있는데, IEEE 에서는 1988년 802.4 token bus 유선 LAN 표준화의 부문으로써 802.4L을 설립하여 무선 LAN에 대한 표준화를 연구하기 시작하였다. 1990년 802.4L에서 802.11로 명칭을 변경하고, MAC(Media Access Control) 계층의 프로토콜로 CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 방식을 표준안으로 채택하여 1997년 1~2 Mbps의 속도를 지원하는 2.4 GHz대에서의 무선 LAN 표준안을 완료하였다.

IEEE 802.11에서 채택한 CSMA/CA 방식의 MAC 계층 프로토콜은 데이터를 수신한 후 ACK (Acknowledgement) 신호를 송신한다.

\* 正會員, 光云大學校 電子通信工學科 通信網研究室  
(Communication Networks Lab., Dept. of Electrical Communication Engineering, Kwangwoon University)  
接受日字: 1999年 5月 6日, 수정완료일: 2000年 1月 20日

본 논문에서는 IEEE 802.11에서 채택한 ACK 신호를 포함하는 CSMA/CA 방식을 Basic CSMA/CA 프로토콜이라 정의한다. 또한 은닉 노드 문제를 해결하기 위하여 RTS(Request To Send)와 CTS(Clear To Send) 신호를 프레임 전송 전에 교환하는 CSMA/CA 방식을 선택사항으로 채택하였다. 본 논문에서는 RTS와 CTS 신호를 프레임 전송하기 전에 교환하는 CSMA/CA 프로토콜을 CTS/RTS 프로토콜이라 정의한다<sup>[3][4]</sup>.

IEEE 802.11위원회가 CSMA/CA 프로토콜을 MAC 표준안으로 채택함에 따라 CSMA/CA 프로토콜 성능분석에 관한 논문들이 발표되고 있지만, backoff 알고리즘의 복잡도(complexity) 때문에 수학적 해석 및 분석은 거의 이루어지지 않고 있다<sup>[5~8]</sup>.

본 논문에서는 IEEE 802.11 MAC 프로토콜의 성능 분석을 위하여 p-persistent CSMA 프로토콜을 적용하여 모델링 하였다<sup>[9~15]</sup>. 그리고 renewal 이론을 적용하여 Basic CSMA/CA 프로토콜, CTS/RTS 프로토콜과 Infrastructure 환경에서 은닉 노드를 고려한 성능분석모델을 제안하고 이를 수학적으로 분석하였다. 제안한 분석 모델의 성능평가를 위하여 active 노드 수, 은닉 노드의 수 그리고 packet 길이에 따른 throughput을 각각 구하였다.

## II. IEEE 802.11 MAC 프로토콜

### 1. 표준안 개요

무선 LAN을 표준화하기 위한 IEEE 802.11은 “지역 내에서의 고정되었거나, 이동이 가능하거나 혹은 이동중인 단말을 연결하기 위한 MAC 계층 및 물리 계층에 대한 규정의 개발”이라는 활동 범위를 가지고 1990년 발족하여 현재에 이르고 있다. IEEE 802.11 위원회는 MAC 프로토콜이 Infra Red, FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum), DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)의 서로 다른 세 가지 종류의 물리계층을 단일 MAC으로 제어할 수 있도록 하고 있다. 또한 IEEE 802.11 MAC 프로토콜은 세 가지 방식 중 어떤 물리계층을 선택하더라도 Ad-hoc/Infrastructure의 두 가지 네트워크 아키텍처를 모두 지원한다.

802.11 LAN은 BSS(Basic Service Set)라는 셀룰러의 셀 구조로 되어 있다. 각각의 BSS는 셀룰러

방식에서 기지국(Base Station)과 같은 역할을 하는 Access Point(AP)에서 제어한다. 그림 1. (a)의 Ad-hoc 아키텍처는 독립된 BSS로서 AP없이 동작하고 IBSS(Independent BSS)라고도 한다. 그림 1. (b)의 Infrastructure는 BSS들이 ESS(Extended Service Set)로 연결되어 있으며 분산 시스템의 제어를 수행한다. BSS내에 있는 단말들은 AP의 제어를 받으며 동일 BSS내에 있는 단말들은 서로 통신할 수 있다. 그리고 다른 BSS에 있는 단말들과도 통신할 수 있다.

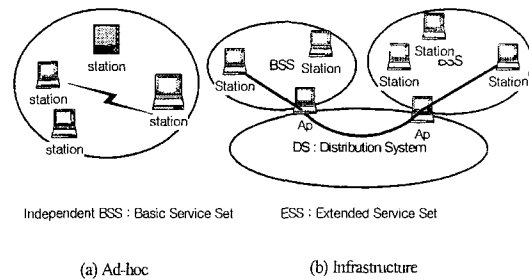


그림 1. Ad-hoc과 Infrastructure 아키텍처  
Fig. 1. Ad-hoc/Infrastructure architecture.

IEEE 802.11에서는 다양한 프레임 사이에 우선권을 주기 위하여 IFS(Inter Frame Space)를 사용한다. IFS는 프레임이 끝나는 시점에서 다음 프레임의 전송시점까지의 시간간격을 의미하는데 프레임을 전송시 IFS 기간만큼 채널이 idle 상태이면 프레임을 전송한다. 이러한 방법으로 짧은 IFS를 가진 프레임이 우선권을 갖게된다. 가장 짧은 길이를 갖는 SIFS(Short Inter Frame Space)는 ACK, RTS 및 CTS 등의 신호 전송에 사용된다. 그러나 데이터 전송에 사용되는 DIFS(Distributed Coordination Function Inter Frame Space)에서는 ACK, CTS 및 RTS 신호가 데이터 프레임에 비하여 우선 순위가 높다

### 2. Basic CSMA/CA 프로토콜

IEEE 802.11 표준안에서는 기본 액세스 메커니즘을 DCF(Distributed Coordination Function)라 하며, MAC 계층 프로토콜로는 CSMA/CA 방식을 사용한다. 동작 원리는 다음과 같다. 우선 단말은 채널을 감지하고 있다가 채널이 DIFS 기간 이상 idle 상태이면 전송하고, busy 상태이면 전송을 연기한다. 그리고 전송 후에 일정시간 까지 ACK 신호가 수신되지 않으면

면 충돌이 발생한 것으로 간주하고 재전송을 시도한다. 재전송 시에는 채널이 DIFS 기간 이상 idle 상태라도 바로 전송하지 않고 랜덤 backoff 알고리즘에 의하여 발생한 타임 슬롯(time slot) 수만큼 카운터를 실행시킨 후 0이 되면 전송한다. 만약 카운터가 감소되다가 채널이 busy 상태가 감지되면 동작이 중단되고, 채널이 DIFS 이상 idle 상태가 계속되면 다시 동작을 시작한다. 충돌 없이 전송이 되었을 경우 수신 단말에서는 ACK 신호를 송신 단말로 전송한다. backoff 지연 시간은 식(1)과 같이 계산되며 충돌이 반복될 때마다 cw(Contention Window)는 두 배씩 증가한다. 즉, cw의 수가 재전송 시도 횟수에 따라 증가하므로 패킷의 충돌 발생 확률은 줄어든다. cw는  $2^i - 1$  에서  $2^{j-1} - 1$ 까지 재전송을 시도한 횟수에 따라 증가한다. 이때 발생하는 backoff 지연 시간은 cw값에 따라  $[0, 2^i - 1]$ 를 갖는다. 이 값은  $2^i$ 개의 정수 중 하나가 선택되므로 32, 64, 128, ... 등으로 나타낼 수 있다.

$$backoff \text{ 지연 시간} = Int[cw \times Random()] \times (\text{타임 슬롯}) \quad (1)$$

여기서, Random():무작위로 발생시킨 0과 1사이의 값

### 3. CTS/RTS 프로토콜

CTS/RTS 프로토콜은 은닉 노드 문제(hidden node problem)를 해결하기 위하여 제안되었다. 그림 2에서 단말 A가 단말 B로 데이터를 전송 시도할 때, 단말 C가 전송되는 신호를 감지하지 못하면 채널을 idle 상태로 간주하여 단말 B로 데이터를 전송한다.

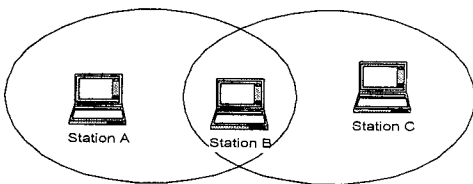


그림 2. 은닉 노드 문제  
Fig. 2. Hidden Node Problem.

이 경우 충돌이 발생하며 이를 은닉 노드 문제라 한다. 이 문제를 해결하기 위하여 단말 A에서 단말 B로 데이터 전송을 시도할 때 우선 RTS 신호를 단말 B에 전송하고 단말 B에서 CTS 신호를 수신한 후 데

이터를 전송한다. 만약 단말 B에서 단말 A가 감지하지 못하는 단말 C와 데이터 송수신 중에 있다면 단말 A로부터 CTS 신호를 받지 못하므로 데이터 전송을 연기하게 된다. IEEE에서는 은닉 노드 문제를 해결하기 위하여 RTS 및 CTS 신호를 프레임 전송 전에 교환하는 CSMA/CA 프로토콜을 채택하였다.

### III. IEEE 802.11 MAC 프로토콜의 성능분석 모델

#### 1. p-persistent CSMA 방식의 IEEE 802.11 MAC 프로토콜 모델

성능분석 모델을 위한 가정 사항은 다음과 같다.

- (1) 단일 BSS에서의 통신만을 고려한다.
- (2) 단말의 수는 무한하다. 즉, 전송 대기 중인 단말이 최소한 하나 이상이 존재한다.
- (3) 현재 전송을 시도하는 단말을 active 노드라 하며 그 수는 M개이고, 각각의 단말은 확률  $p$ 로 각각의 경쟁 슬롯에서 전송을 시도한다.
- (4) 채널에서의 잠음 등으로 인한 전송 오류는 없다. 그러므로 오류 발생은 두 대 이상의 단말이 동시에 패킷을 전송한 경우뿐이다.
- (5) 전파지연시간은 무시한다.
- (6) 데이터를 수신한 후 ACK 신호를 전송할 때 DIFS 보다 짧은 SIFS를 대기 후 전송하므로 충돌은 없다.
- (7) 패킷의 길이는 수학적 분석을 간단하게 하기 위하여 패킷 전송시간을 1로 고정하였으며, 이를 파라미터에 대한 기본 단위 시간으로 설정하였다.

$p$ -persistent CSMA에서는 단말에서 대기중인 패킷을 전송할 확률이 항상 고정된 값을 갖지만, backoff 알고리즘을 이용하는 CSMA/CA 프로토콜에서는 패킷 전송 확률 즉,  $p(0 \leq p \leq 1)$ 가 충돌 횟수에 따라 가변이다. 전송을 시도하는 active 노드 수가 증가할수록 평균 cw는 커지고 패킷 전송 확률은 작아진다. active 노드 수에 따른 패킷 전송 확률은 다음과 같다.

$$p = 2 / (E[cw] + 1) \quad (2)$$

또한, 특정 단말이 패킷 전송에 성공할 때까지 발생시킨 cw 발생확률은 다음과 같다.

$$P\{cw = x\} = \sum_{h=0}^{\infty} P\{cw = x \mid cw \in E_h\} P\{cw \in E_h\} \quad (3)$$

식 (3)에서  $P\{cw \in E_h\}$ 는 다음과 같다.

$$P\{cw \in E_h\} = \frac{(h+1)P\{N_c = h\}}{N_c + 1} \quad (4)$$

여기서,  $E_h$  : 특정 단말이 패킷 전송에 성공할 때까지 발생시킨 cw의 집합

$h$  : 특정 단말이 패킷 전송에 성공할 때까지 실패한 횟수

$N_c$  : 평균 실패 횟수

cw가 32~256일 때  $P\{cw = x \mid cw \in E_h\}$ 을 표 1에 나타내었다.

표 1. cw가 32~256일 때 특정한 단말에서 충돌 횟수에 따른 cw확률

Table 1. Probability of each contention window size for number of collision variation at tagged station with cw 32~256.

	$E_h$			
	$h=0$	$h=1$	$h=2$	$h=j$ ( $j \geq 3$ )
$P\{cw = 32 \mid cw \in E_h\}$	1	1/2	1/3	1/(j+1)
$P\{cw = 64 \mid cw \in E_h\}$	0	1/2	1/3	1/(j+1)
$P\{cw = 128 \mid cw \in E_h\}$	0	0	1/3	1/(j+1)
$P\{cw = 256 \mid cw \in E_h\}$	0	0	0	(j-2)/(j+1)

cw수의 평균을 구하기 위하여 식(2)를  $E[cw]$ 에 대하여 정리하였고, 결과는 식(5)와 같다.

$$E[cw] = \frac{2}{p} - 1 = P_{idle} \left\{ 32 + 64(1 - P_{idle}) + 128(1 - P_{idle})^2 + 256 \frac{(1 - P_{idle})^3}{P_{idle}} \right\} \quad (5)$$

여기서,  $P_{idle}$  : 단말이 idle 상태에서 경쟁 슬롯에 대기할 확률

식 (5)를 이용하여 cw가 32~256일 때, active 노드 수(M)의 변화에 따른 단말에서 대기중인 패킷을 전송할 확률(p)을 구한 결과를 표 2에 나타내었다.

표 2. cw가 32~256일 때 active 노드에 따른 전송 성공 확률

Table 2. Successful transmission probability for active nodes variation with cw 32~256.

M	cw	p
1	32	0.06061
2	34.0576	0.05705
3	36.1962	0.05377
4	38.3646	0.05087
5	40.5248	0.04816
6	42.654	0.04582
7	44.7399	0.04373
8	46.777	0.04186
9	48.7632	0.04019
10	50.6991	0.03869
20	67.7002	0.02911
50	104	0.019

2. 은닉 노드를 고려한 IEEE 802.11 MAC 프로토콜 성능분석모델

은닉 노드를 고려하기 위하여 그림 3과 같은 통신망을 가정하였다.

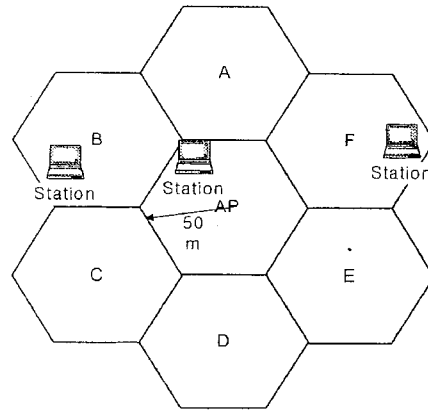


그림 3. 은닉 노드 모델  
Fig. 3. Hidden Node Model.

AP가 위치한 지역에 있는 단말들은 모든 범위의 통신을 감지하고, 지역 A, B, C에 있는 단말들은 인접 지역의 신호만을 감지할 수 있다. 즉 지역 B에 있는 단말이 감지할 수 있는 지역은 A와 C 그리고 AP 지역이다. AP cover range(약 50m) 안의 모든 단말은 서로 직접 통신할 수 있다. 따라서 은닉 노드

는 AP의 cover range 범위 밖으로 멀어져도 다른 BSS로 로밍(roaming)하거나 off 되지 않는다. 현재의 BSS를 사용하는 경우, 즉 A지역 내에 있는 단말이 중앙에 있는 단말과 통신할 때 F지역에 있는 단말도 중앙에 위치한 단말과 통신을 시도할 경우 은닉 노드가 발생한다고 보았다. 이때 은닉 노드가 있을 확률인  $p_h$ 는 전체 단말 수와 은닉 노드 수의 비로 나타낼 수 있고, Infrastructure의 BSS안에서의 통신은 단말과 AP간에 이루어진다. 즉 은닉 노드간의 직접 통신은 없다. B지역에 위치한 은닉 노드의 경우 A, B, C 지역에 있는 은닉 노드를 감지 할 수 있으므로, 은닉 노드가 다른 은닉 노드의 전송을 감지 할 수 있는 확률은 1/2이다. 그러므로 n개의 은닉 노드들이 서로 전송을 감지할 수 있는 확률은  $(1/2)^n$ 이 된다.

#### IV. IEEE 802.11 MAC 프로토콜의 수학적 분석

##### 1. Basic CSMA/CA 프로토콜 분석

Basic CSMA/CA 프로토콜 채널모델은 그림 4와 같다.

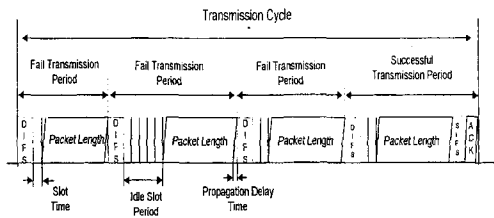


그림 4. Basic 802.11 CSMA/CA 프로토콜의 채널 모델  
Fig. 4. Channel Model of Basic 802.11 CSMA/CA Protocol.

idle 주기는 backoff 알고리즘에 의하여 발생하고 단말 하나가 전송에 성공할 때까지의 주기라 하고, idle 슬롯이후 한 슬롯에 단말 한 대만이 전송을 시도할 경우를 전송에 성공한 주기라 한다. 따라서, active 노드 수가 M개일 경우 임의의 단말이 한 슬롯에서 채널을 획득할 확률,  $P_A$ 는 다음과 같다.

$$P_A = M \cdot p(1-p)^{M-1} \quad (6)$$

즉,  $P_A$ 는 active 노드가 M개 존재하더라도 한 슬롯을 하나의 노드만이 획득하므로, 여러 패킷이 발생하

여 충돌하는 경우를 배제한 확률이다. 이때 한 단말이 채널이 idle한 상태에서 경쟁 슬롯에 대기할 확률은 다음과 같다.

$$P_{idle} = (1-p)^M \quad (7)$$

따라서 전송 주기 동안의 평균 idle 슬롯주기는 다음과 같다.

$$E[\text{idle 슬롯주기}] = \frac{P_{idle}}{1-P_{idle}} \times (\text{슬롯 시간}) \quad (8)$$

idle 슬롯 수에 상관없이 전송 주기 동안에 성공할 확률( $P_S$ )은 다음과 같다.

$$P_S = \frac{M \cdot p(1-p)^{M-1}}{1-(1-p)^M} \quad (9)$$

따라서, 전송에 성공할 때까지의 평균 실패 횟수는 다음과 같다.

$$E[\text{전송 실패 횟수}] = 1/P_S - 1 \quad (10)$$

전송 주기 동안의 성공적인 전송 주기와 실패 전송 주기는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{성공적인 전송주기} &= 2\tau + 1 + SIFS + DIFS \\ &\quad + E[\text{idle 슬롯 주기}] + ACK \\ \text{실패 전송주기} &= \tau + 1 + DIFS + E[\text{idle 슬롯주기}] \end{aligned} \quad (11)$$

여기서,  $\tau$ : 전송 지연 시간  
throughput S는 식 (12)와 같다.

$$S = \frac{U}{B+I} \quad (12)$$

여기서, B : 평균 busy period  
I : 평균 idle period  
U : 충돌 없이 전송매체를 이용한 시간  
따라서 throughput S는 식(8),(10),(11),(12)에 의하여 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} S &= 1 / [ [\tau + 1 + DIFS + E[\text{idle 슬롯주기}]] \\ &\quad \times (1/P_S - 1) + [2\tau + 1 + SIFS + DIFS \\ &\quad + E[\text{idle 슬롯 주기}] + ACK] ] \end{aligned} \quad (13)$$

##### 2. CTS/RTS 프로토콜 분석

CTS/RTS 프로토콜은 그림 5와 같이 데이터 전송 전에 CTS/RTS 신호를 송수신한 후 프레임을 전송한다.

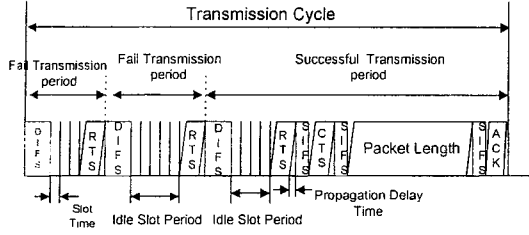


그림 5. CTS/RTS 프로토콜의 채널모델  
Fig. 5. Channel Model of CTS/RTS Protocol.

성공적인 전송 주기와 실패 전송 주기는 식(14)와 같다.

$$\begin{aligned} \text{성공적인 전송주기} &= 4\tau + 3SIFS + ACK + DIFS \\ &\quad + 1 + RTS + CTS + E[\text{idle 슬롯 주기}] \\ \text{실패 전송주기} &= RTS + \tau + E[\text{idle 슬롯 주기}] \\ &\quad + DIFS \end{aligned} \quad (14)$$

따라서 throughput S는 다음과 같다.

$$S = \frac{1}{(\text{성공적인 전송주기}) + (\text{실패 전송주기}) \left( \frac{1}{P_s} - 1 \right)} \quad (15)$$

### 3. 은닉 노드를 고려한 Basic CSMA/CA 프로토콜 분석

은닉 노드가 전송에 성공하는 경우는 은닉 노드가 가장 먼저 전송을 시도하고 다른 은닉 노드들은 가장 먼저 전송한 은닉 노드의 전송을 감지하는 경우이다. 현재 active 상태인 M개의 노드 중 은닉 노드가 n개 있을 확률  $p_h(n)$ 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} p_h(n) &= \frac{k(1-p_h)C_{M-n} \times k p_h C_n}{k C_M} \\ &= \frac{k(1-p_h)!}{(k(1-p_h)-(M-n))!(M-n)!} \times \\ &\quad \frac{k p_h!}{(k p_h - n)! n!} \times \frac{(k-M)! M!}{k!} \\ &= \frac{k!(1-p_h)}{(k(1-p_h)-(M-n))!} \times \frac{k! p_h}{(k p_h - n)!} \\ &\quad \times \frac{(k-M)!}{k!} \times \frac{M!}{(M-n)! n!} \\ &= (1-p_h)^{M-n} p_h^n {}_M C_n \end{aligned} \quad (16)$$

여기서, k : 전체 단말의 수

$p_h$  : 은닉 노드가 존재할 확률

한 전송주기동안 은닉 노드 수의 변화에 따른 전송 성공 확률은 표 3과 같다.

표 3. 은닉 노드 수에 따른 전송 성공 확률  
Table 3. Successful transmission probability for number of hidden nodes.

은닉 노드의 수	전송에 성공할 확률
0	$P_s$
1	$\frac{P_s}{M}$
2	$2 \left( \frac{P_s}{M} \right) \left( \frac{1}{2} \right)^2$
3	$3 \left( \frac{P_s}{M} \right) \left( \frac{1}{2} \right)^3$
n	$n \left( \frac{P_s}{M} \right) \left( \frac{1}{2} \right)^n$ (단, $n \geq 2$ )

한 전송 주기동안 은닉 노드 수, 즉 n에 상관없이 전송에 성공할 확률은 식(17)과 같다.

$$\begin{aligned} P_{Sh} &= (1-p_h)^M P_s + (1-p_h)^{M-1} P_s \\ &\quad + \sum_{n=2}^M \left[ (1-p_h)^{M-n} {}_M C_n p_h^n \left( \frac{1}{2} \right)^n \frac{P_s}{M} n \right] \end{aligned} \quad (17)$$

식 (17)을 이용하여 평균 전송 실패 수를 구할 수 있으며, 식 (18)과 같다.

$$E[\text{전송 실패 수}] = (1/P_{Sh}) - 1 \quad (18)$$

은닉 노드가 존재할 때의 평균 전송 주기는 없을 경우에 비하여 길어진다. 이는 다른 단말이 전송 중임에도 불구하고 전송을 감지 못한 은닉 노드가 전송을 하므로 충돌이 발생하여 전송주기가 길어지기 때문이다. 따라서 은닉 노드가 존재할 때의 전송 주기는 은닉 노드에 의해 결정된다. 즉 그림 6에서와 같이 은닉 노드의 실패 전송 주기는 "idle slot period + packet +  $\tau$  + DIFS"가 된다.

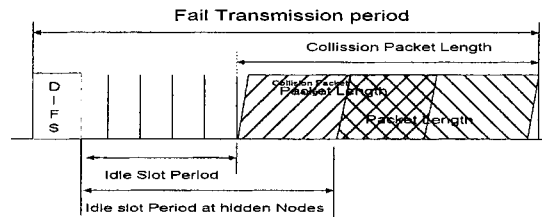


그림 6. 은닉 노드 존재 시 전송 주기  
Fig. 6. Transmission Period with Hidden Nodes.

은닉 노드의 수가 n개 일 때 E[idle 슬롯주기]는 E[은닉 노드의 idle 슬롯 수]와 [슬롯 시간]의 곱으로 나타난다.

(1) 은닉 노드가 없을 때 :  $\frac{(1-p)^M}{1-(1-p)^M}$

(2) 은닉 노드가 1개일 경우 :  $\frac{1-p}{p}$

· 은닉 노드가 2개일 경우 : 다음의 두 가지 경우로 나뉜다.

(경우 1) 은닉 노드들이 서로 감지 할 수 없는 경우로 각각의 idle slot의 발생은 독립이며 평균 idle 슬롯 주기는  $\frac{1-p}{p}$  이고, 은닉 노드들이 서로를 감지 하지 못할 확률은  $(1-(\frac{1}{2}))^2 \frac{1-p}{p}$  이다.

(경우 2) 은닉 노드들이 서로 전송을 감지 할 수 있는 경우로 은닉 노드들에 의해 결정되므로 idle slot 주기는  $\frac{(1-p)^2}{1-(1-p)^2}$  이고, 은닉 노드들이 서로의 전송을 감지할 확률은  $(\frac{1}{2})^2 \frac{(1-p)^2}{1-(1-p)^2}$  이다. 따라서, (경우 1)과 (경우 2)를 모두 고려하면

$$\left\{ \left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^2\right) \frac{1-p}{p} + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \frac{(1-p)^2}{1-(1-p)^2} \right\} \text{이 된다.}$$

(3) 은닉 노드가 3개일 경우 :

$$\left\{ \left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^3\right) \frac{1-p}{p} + \left(\frac{1}{2}\right)^3 \frac{(1-p)^3}{1-(1-p)^3} \right\}$$

(4) 은닉 노드가 n개일 경우 :

$$\left\{ \left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^n\right) \frac{1-p}{p} + \left(\frac{1}{2}\right)^n \frac{(1-p)^n}{1-(1-p)^n} \right\}$$

(단, n은 2이상일 경우)

따라서, 은닉 노드의 평균 idle 슬롯 수는 식 (19)와 같다.

E[은닉 노드의 idle 슬롯 수]=

$$(1-p_h)^M \frac{(1-p)^M}{1-(1-p)^M} + \sum_{n=1}^M \left[ (1-p_h)^{M-n} \cdot {}_M C_n \cdot p_h^n \left\{ \left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^n\right) \frac{1-p}{p} + \left(\frac{1}{2}\right)^n \frac{(1-p)^n}{1-(1-p)^n} \right\} \right] \quad (19)$$

은닉 노드를 고려한 경우, Basic CSMA/CA 프로토콜의 성공적인 전송 주기와 실패 전송 주기는 식 (20) 같다.

$$\text{성공적인 전송 주기} = 1 + 2\tau + SIFS + ACK + DIFS + E[\text{은닉 노드의 idle 슬롯 수}]$$

$$\text{실패 전송 주기} = 1 + \tau + DIFS + E[\text{은닉 노드의 idle 슬롯 수}] \quad (20)$$

따라서, throughput S는 식(21) 같다.

$$S = 1 / \left[ [1 + \tau + E[\text{은닉 노드의 idle 슬롯 수}] + DIFS] \times \left( \frac{1}{P_{Sth}} - 1 \right) + [1 + 2\tau + SIFS + ACK + E[\text{은닉 노드의 idle 슬롯 수}] + DIFS] \right] \quad (21)$$

### V. 결과 및 고찰

본 절에서는 제안한 분석모델을 수학적 분석을 통하여 throughput을 구한 후, 그 결과 값들을 시뮬레이션 한 결과들과 비교해 보았다. 이때 각 단말들은 Poisson 분포로 발생하고, 각 단말들에 대한 서비스 시간은 지수 분포를 따른다. 또한, 모든 노드는 동일한 조건 하에 있다고 가정하였으므로, 모든 단말들은 동일한 도착률을 갖는다. 또한 시뮬레이션 모델은 가능한 실제 시스템의 모델과 유사하게 하기 위하여 각 단말에서의 의 처리시간 및 AP에서의 처리시간, 그리고 채널의 전송시간을 각각 고려하였다. 즉, 각 단말의 처리시간은 평균 0.003[sec]인 Uniform 분포로, AP에서의 처리시간은 평균 0.005[sec]인 Uniform 분포로, 그리고 채널의 전송시간은 평균 0.02[sec]인 Uniform 분포로 가정하였다. 또한 시뮬레이션 언어로는 Visual C++ 4.0을 사용하였으며, Pentium-III 450 기종에서 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션은 주기적으로 결과값을 비교하여 오차율이 10<sup>-3</sup>이하가 되면 종료하도록 구현하였다. 표 4에 시뮬레이션 파라미터를 나타내었다.

표 4. 시뮬레이션 파라미터  
Table 4. Simulation Parameters.

평균 프레임의 길이	1
slot time	0.01 [sec]
전송지연시간(τ)	0.0002 [sec]
SIFS	0.006 [sec]
DIFS	0.026 [sec]
Ack	0.016 [sec]
RTS	0.016 [sec]
CTS	0.016 [sec]

그림 7에 IEEE 802.11 MAC 프로토콜의 throughput에 대한 수학적 분석 결과를 나타내었다.

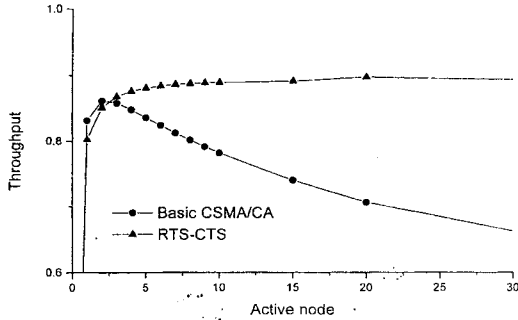


그림 7. IEEE 802.11 MAC 프로토콜의 throughput  
Fig. 7. Throughput for IEEE 802.11 MAC protocol.

active 노드 수가 적을 때는 Basic CSMA/CA 프로토콜이 CTS/RTS 프로토콜 방식에 비하여 우수하지만 active 노드 수가 많을 때는 CTS/RTS 프로토콜이 더 우수하였다. 이는 active 노드 수가 적을 때는 패킷의 충돌 확률이 적다. 즉 CTS 및 RTS를 교환하는 시간이 충돌하는 패킷의 길이에 비하여 커지므로 Basic CSMA/CA 프로토콜 방식이 우수하고, active 노드 수가 증가하면 충돌 확률이 증가하기 때문에 CTS 및 RTS 신호를 교환하는 시간이 충돌하는 패킷의 길이에 비하여 상대적으로 작아지므로 CTS/RTS 프로토콜이 우수한 성능을 보였다. 그림 8은 은닉 노드를 고려한 Basic CSMA/CA 프로토콜의 throughput에 대한 수학적 분석 결과이다.

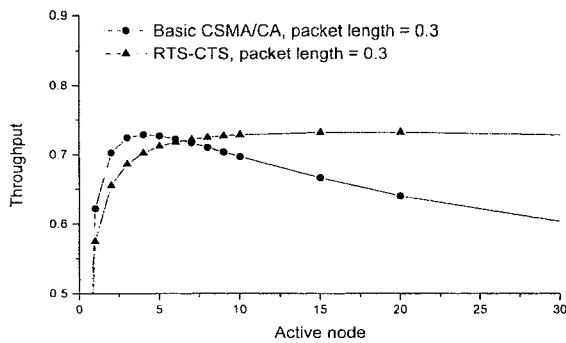


그림 8. 은닉 노드를 고려한 Basic CSMA/CA 및 CTS/RTS 프로토콜의 throughput 비교  
Fig. 8. Comparison of Throughput for Basic CSMA/CA and CTS/RTS Protocol with Hidden Nodes.

active 노드 수가 적을 때에는 크게 영향을 받지 않으며, active 노드 수가 증가할수록 은닉 노드의 영향이 커짐을 알 수 있다. 그림 9에 패킷 길이에 대한 throughput 변화를 수학적으로 분석한 결과를 나타내었다.

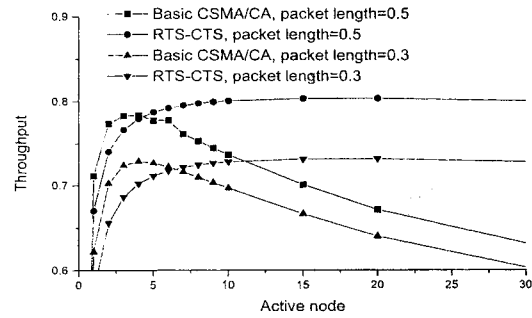


그림 9. 패킷 길이에 대한 IEEE 802.11 MAC 프로토콜의 throughput  
Fig. 9. Throughput of IEEE 802.11 MAC protocol with variable Packet Length.

패킷의 길이가 작을 때에는 CTS와 RTS 신호 교환이 실제 데이터 패킷에 비하여 상대적으로 길어지므로 Basic CSMA/CA 프로토콜 방식의 성능이 우수하고, 패킷 길이가 긴 경우에는 CTS/RTS 프로토콜 방식이 우수한 성능을 보였다. 그리고 패킷 길이가 짧아지면 CTS/RTS 프로토콜이 Basic CSMA/CA 프로토콜보다 성능이 좋아진다.

표 5. 은닉 노드를 고려한 Basic CSMA/CA 및 CTS/RTS 프로토콜의 시뮬레이션 결과와 Analytic 결과 비교

Table 5. Comparison of Simulation and analytic results for Basic CSMA/CA and CTS/RTS Protocol.

노드 수	Basic CSMA/CA (packet length = 0.3)		RTS/CTS 프로토콜 (packet length = 0.3)	
	시뮬레이션	수학적분석	시뮬레이션	수학적분석
1	0.625	0.625	0.570	0.571
2	0.700	0.710	0.650	0.652
3	0.739	0.738	0.690	0.690
4	0.740	0.741	0.700	0.701
5	0.739	0.738	0.710	0.713
6	0.735	0.735	0.720	0.720
7	0.731	0.728	0.728	0.729
8	0.700	0.701	0.730	0.731
9	0.690	0.687	0.735	0.733
10	0.675	0.672	0.735	0.734
15	0.650	0.651	0.735	0.736
20	0.630	0.630	0.740	0.741



표 5 및 6은 수학적 분석의 결과값과 컴퓨터 시뮬레이션을 한 결과값을 비교한 표이다. 표 5 및 6에서 알 수 있듯이, 수학적으로 해석한 값과 시뮬레이션 한 값의 차이가 0.5% 이내이므로 수학적 분석의 결과값이 타당성이 있다고 볼 수 있다. 이러한 값의 차이가 생기는 이유는 본 모델을 실제 시스템과 유사하게 하기 위하여 시뮬레이션 상에서는 단말 및 AP에서의 처리시간과 전송채널의 전송시간을 고려하였기 때문이다.

표 6. 패킷 길이에 따른 IEEE 802.11 MAC 프로토콜의 시뮬레이션 결과와 Analytic 결과 비교

Table 6. Comparison of Simulation and analytic results for IEEE 802.11 MAC Protocol with variable Packet Length.

노드 수	packet length = 0.5				packet length = 0.3			
	Basic CSMA/CA		RTS/CTS 프로토콜		Basic CSMA/CA		RTS/CTS 프로토콜	
	시뮬레이션	수학적 분석	시뮬레이션	수학적 분석	시뮬레이션	수학적 분석	시뮬레이션	수학적 분석
1	0.670	0.672	0.682	0.673	0.625	0.625	0.570	0.571
2	0.772	0.770	0.746	0.735	0.700	0.710	0.650	0.652
3	0.779	0.781	0.780	0.772	0.739	0.738	0.690	0.690
4	0.780	0.783	0.785	0.784	0.740	0.741	0.700	0.701
5	0.780	0.782	0.811	0.797	0.739	0.738	0.710	0.713
6	0.780	0.782	0.811	0.810	0.735	0.735	0.720	0.720
7	0.764	0.752	0.812	0.811	0.731	0.728	0.728	0.729
8	0.753	0.748	0.815	0.814	0.700	0.701	0.730	0.731
9	0.750	0.746	0.816	0.816	0.690	0.687	0.735	0.733
10	0.742	0.741	0.821	0.820	0.675	0.672	0.735	0.734
15	0.730	0.728	0.821	0.822	0.650	0.651	0.735	0.736
20	0.686	0.681	0.821	0.822	0.630	0.630	0.740	0.741

VI. 결론

본 논문에서는 p-persistent CSMA 방식으로 IEEE 802.11 MAC 프로토콜을 모델링 하였으며, renewal 이론을 기본으로 하여 수학적으로 분석한 Basic CSMA/CA 프로토콜, CTS/RTS 프로토콜 그리고 Infrastructure 환경에서 은닉 노드를 고려한 Basic CSMA/CA 프로토콜의 성능분석모델을 제안하였다. 제안한 성능분석모델은 backoff 알고리즘을 p-persistent CSMA 프로토콜 방식에 적용하여 active 노드에 대한 분석을 함으로써 성능분석모델에 충돌로 인한 cw값의 변화를 고려할 수 있었고 은닉 노드가 throughput에 끼치는 영향을 고려할 수 있었다.

수학적 분석 결과 active 노드 수가 많고 패킷의 길이가 긴 경우, 그리고 burst data 전송이나 은닉 노드 발생이 빈번할 것으로 예상되는 환경에서는 CTS/RTS 프로토콜이 우수한 성능을 보이고, 반대로 active 노드 수가 적거나 bursty성 data 전송이나 은닉 노드 발생이 적을 것으로 예상되는 통신환경에서는 Basic CSMA/CA 프로토콜을 사용하는 것이 우수한 성능을 보였다.

수학적으로 해석한 값과 시뮬레이션 한 값의 차이가 0.5% 이내이므로 수학적 분석의 결과값이 타당성이 있다고 볼 수 있다.

참고 문헌

[1] Ellen Kayata Wesel, *Wireless Multimedia Communications*, Addison-Wesley, 1998.

[2] R. A. Dayem, *Mobile Data & Wireless LAN Technologies*, Prentice Hall PTR, 1997.

[3] "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification", IEEE Standard Draft. 1996.

[4] V. Bharghavan, "MACAW : A Media Access Protocol for Wireless LANs", Proceeding SIGCOMM'94 conf. , ACM, pp. 212 ~225, 1994.

[5] J.L. Sobrinho, A. S Krishnakumar, " Real-Time Traffic over the IEEE 802.11 Medium Access Control Layer", Bell Labs Technical Journal, V.1 N. 2, 19960801, Lucent Technology.

[6] Sulaiman Mohd Nor, "Performance of CSMA/CA MAC Protocol For Distributed Radio Local Area Networks", Proceedings of the 6th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Volume 2, 19950927, Toronto, Canada.

[7] H.S. Chhaya, "Performance Evaluation Of The IEEE 802.11 MAC Protocol For Wireless LANs", Master Thesis, Illinois Institute of Technology, May 1996, Chicago, Illinois.

[8] B. P. Crow, "Performance Evaluation of the

- IEEE 802.11 Wireless Local Area Network protocol", Master Thesis, Department of Electrical and computer Engineering University Of Arizona, 1996.
- [9] G. Bianchi, L. Fratta, M. Oliver, "Performance Evaluation and Enhancement of the CSMA/CA MAC Protocol for 802.11 Wireless LANs", PIMRC 96.
- [10] F. Cali, M. Conti, "IEEE 802.11 Wireless LAN: capacity Analysis Protocol Enhancement", IEEE Infocom98, 1998.
- [11] J. H. Kim, J. K. Lee, "Performance Analysis of Wireless MAC Protocol with Rayleigh Fading Log-normal shadowing and Capture Effect", IEICE Transaction on Communication, V. E81-B No.1
- [12] L. Kleinrock, F. A. Tobagi, "Packet Switching in Radio Channel: Part I-Carrier Sense Multiple-Access Modes and Their Throughput-Delay Characteristics", IEEE Transactions on Communication, Vol. 23, 1975, pp. 1400~1416.
- [13] L. Kleinrock, F. A. Tobagi, "Packet Switching in Radio Channel: Part II-The Hidden Terminal Problem in Carrier Sense Multiple-Access and the Busy-Tone solution", IEEE Trans on Comm., Vol. 23, 1975, pp. 1417~1433
- [14] Metcalfe, Boggs, "Ethernet: Distributed Packet Switching for Local Computer Networks", Comm. of ACM, vol 19, pp. 395~404, July 1976
- [15] Bertsekas, Gallager, Data Network 2nd ed., Englewood Cliffs, NJ; Prentice Hall, 1992.

## 저 자 소 개



洪成哲(正會員)

1995년 2월 광운대학교 전자통신 공학과 졸업(공학사). 1997년 9월~2000년 1월 현재 광운대학교 전자통신 공학과 석사과정. 주관심분야는 무선 LAN, 차세대 이동 통신망,

Wireless Internet



裴成洙(正會員)

1995년 2월 광운대학교 전자통신 공학과 졸업(공학사). 1997년 8월 광운대학교 전자통신공학과 졸업(공학 석사). 2000년 1월 현재 광운대학교 전자통신공학과 박사과정. 주

관심분야는 무선망 최적화 이론, 차세대 이동 통신망, Wireless Internet IMT-2000

吳 暎 煥(正會員) 第 34卷 S編 第 9號 參照