

논문 2005-42TC-10-6

# IEEE 802.11 DCF 성능 개선을 위한 매체접근제어 알고리즘의 설계 및 성능 분석

(Design and Performance Analysis of an Enhanced MAC Algorithm for  
the IEEE 802.11 DCF)

황 안 규\*, 이 재 용\*\*, 김 병 철\*\*

(An-Kyu Hwang, Jae-Yong Lee, and Byung-Chul Kim)

## 요 약

본 논문에서는 IEEE 802.11 WLAN의 MAC인 DCF의 성능을 개선하는 알고리즘을 제안하고 이를 수학적으로 분석한다. IEEE 802.11 WLAN의 MAC에서는 데이터를 전송하기 위한 방법으로 "Distributed Coordination Function(DCF)"과 "Point Coordination Function(PCF)"를 사용하며, DCF의 경우 Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA)를 기반으로 한다. CSMA/CA는 단말 간의 충돌을 줄이기 위해서 임의의 backoff time을 각 단말의 contention window(CW) 범위에서 결정한다. 단말은 패킷 전송 후 충돌시 윈도우 크기를 두배로 증가시키며, 성공적인 전송 후에는 윈도우 크기를 최소 CW로 감소하게 된다. 본 논문에서는 패킷의 정상적인 전송 후에 윈도우 값을 서서히 감소함으로써 현재 WLAN의 망 상태정보를 계속 활용함으로써 패킷 충돌 확률을 낮추는 알고리즘을 제안하였고, 불포화상태에서의 전송량에 대한 수학적 분석을 하였다. 또한, 시뮬레이션을 통해 WLAN의 포화상태에서 전송량이 향상되었음을 보였고, 수학적 분석 결과와 시뮬레이션 결과가 일치함을 확인하였다.

## Abstract

In this paper, we propose a performance improving MAC algorithm for the IEEE 802.11 DCF. WLAN based IEEE 802.11 uses two control methods called "Distributed Coordination Function(DCF)" and "Point Coordination Function(PCF)". The DCF controls the transmission based on carrier sense multiple access with collision detection(CSMA/CA), that decides a random backoff time with the range of contention window for each terminal. Normally, each terminal the CW double after collision, and reduces the CW to the minimum after successful transmission. This paper proposes an enhanced DCF algorithm that decreases the CW smoothly after successful transmission in order to reduce the collision probability by utilizing the current status information of WLAN. We also analyze the throughput and delay performance for the unsaturated case mathematically. Simulation results show that our algorithm enhances the saturation throughput of WLAN. They also coincide well with the analytical results.

**Keywords** : IEEE 802.11 DCF, Wireless LAN, CSMA/CA, performance analysis

## I. 서 론

노트북, PDA등의 이동 단말기를 사용해 초고속 무선

인터넷 서비스를 인터넷 이용 수요가 밀집한 공공장소 즉, 핫스팟에서 WLAN을 통해 제공하고자 하는 많은 노력이 세계의 많은 우수 기업에서 진행되고 있다. 이러한 추세에 맞추어 wireless LAN<sup>[1]</sup>을 구현하기 위한 규격인 IEEE 802.11이 1999년에 처음 발표되었고 2.4GHz대와 5GHz대의 무선 주파수를 사용하여 다양한 전송 속도를 지원하는 제품이 출시되었다. 이중 현재는 Direct Sequence(DS) 대역 확산 기법을 이용하여 최대 11Mbps를 지원하는 IEEE 802.11b 표준이 가장 많은

\* 학생회원, 충남대학교 정보통신공학과  
(Department of Information and Communications  
Engineering, Chungnam National University)

\*\* 정회원, 충남대학교 전기정보통신공학부  
(Electronics, Radio, Information communications  
Engineering, Chungnam National University)

접수일자: 2005년3월17일, 수정완료일: 2005년10월14일

시장을 구축하고 있다.

IEEE 802.11 WLAN MAC에서는 데이터를 액세스하기 위한 방법으로 Distributed Coordination Function (DCF)과 Point Coordination Function (PCF)를 사용한다. IEEE 802.11 WLAN의 기본적인 데이터 액세스 방법으로 사용하는 DCF의 경우 Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA)를 기반으로 하여 모든 station이 동등한 관계에서 경쟁을 통해 채널을 사용하게 된다. 반면, PCF는 Access Point(AP)와 같은 중앙의 조절자에 의한 Polling방식을 이용하여 station들이 채널을 사용할 수 있게 관리한다.

CSMA/CA는 각 station간의 충돌을 줄이기 위해서 random backoff time을 사용하고 있다<sup>[2][3][4]</sup>. random backoff time을 결정하기 위해서 각 station은 최소 contention window(CW) 구간( $CW_{min}$ )과 최대 CW 구간( $CW_{max}$ )을 갖게 된다. 각 station은 채널을 사용하기 전에 0과  $CW_{min}$  범위에서 임의의 CW 값을 선택하게 되며, 이 값과 slot time의 곱으로 random backoff time을 계산하게 된다. Station은 채널이 유희한 시간만큼 backoff time을 줄이게 되며 가장 먼저 0에 도달하는 station이 채널을 사용하게 된다. 만약 두개 이상의 station에 의해 충돌이 발생하게 되면 재전송을 하게 되며, 충돌 확률을 줄이기 위해서 backoff contention 범위를 2배로 증가한 후에 임의의 CW를 선택하며 이에 따른 새로운 backoff time을 계산하게 된다. 충돌에 의해 증가되는 backoff contention 범위는  $CW_{max}$  값까지 증가하며, 그 이상 증가하지 않고 최대 전송 횟수만큼 시도한 후에도 실패하면 그 데이터 전송을 포기하게 된다. 전송이 성공적으로 이루어졌을 경우 backoff contention 범위는  $CW_{min}$  값을 갖게 된다.

본 논문에서는 전송이 성공적으로 이루어졌을 경우 backoff contention 범위를  $CW_{min}$  값으로 되돌리지 않고 반으로 줄임으로써 충돌에 대한 확률을 적게 하여 망의 효율을 높일 수 있는 알고리즘으로써 시뮬레이션 결과와 수학적 성능분석을 통해서 검증하였다. 각 노드의 트래픽이 포화 상태일 경우 성능이 최대 전송량보다 적게 나타나는 부분을 보완하였고, 불포화 상태에서의 전송량도 기존의 방식보다 감소하지 않음을 확인할 수 있었다. 또한 불포화상태에서  $\lambda$ 의 변화에 따른 전송량을 수학적으로 분석하여 시뮬레이션과 비교하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서는 IEEE

802.11의 MAC 프로토콜인 DCF에 대해서 설명하며, 제 III장에서는 제안된 알고리즘에 대한 포화상태에서의 전송량 및 패킷경쟁 지연시간과 불포화 상태에서의 전송량을 수학적으로 분석하였다. 제IV장에서는 이를 시뮬레이션을 통해 성능분석 하였고 마지막으로 제V장에서 결론 및 향후 연구 계획을 제시한다.

## II. IEEE 802.11 DCF의 매체 접근 제어 방식

DCF는 IEEE 802.11 MAC의 기본적인 매체 접근 방식으로서, CSMA/CA방식을 따른다. 그림 1은 DCF 환경에서 단말의 동작을 보여준다. busy medium이 끝나고 DIFS 동안 매체가 유희 상태이면, random backoff time을 생성하여 매체에 대한 접근을 연기한다. 매체에 대한 접근을 연기한 단말들은 매체의 상태를 확인하면서 동시에 자신의 random backoff time을 감소시켜 나간다. 만약 어떤 단말의 backoff time이 0이 될 때까지 매체가 유희 상태이면 그 단말은 매체에 접근하게 되고, 0이 되기 전에 매체를 다른 단말이 사용하게 되면 backoff time을 줄이는 것을 멈추고 다음 DIFS 후에, 남아있는 backoff time을 사용한다. 따라서, 이 단말은 처음 random backoff time을 생성한 단말보다 더 작은 backoff time을 가지게 될 확률이 높으므로 매체에 접근할 가능성 또한 높다. 그러다가 backoff 시간이 0이 되면 패킷을 전송하게 되며, ACK을 통해 패킷 전송에 대한 성공여부를 결정한다. 패킷이 성공적으로 전송 되었을 경우 CW 값을  $CW_{min}$  값으로 감소시키며, 충돌로 감지했을 경우 CW 값을 2배로 증가시킨다.

Virtual carrier sense기법은 채널에 대한 예약 정보를 알리는 방식으로, 실제 데이터를 전송하기 전에 미리 짧은 길이의 RTS(Ready To Send)와 CTS(Clear To Send)를 교환하여 채널의 예약을 알리는 방식이다. 그림 2는 DCF에서 RTS/CTS 방식에 대한 그림을 보여준다. 가장 짧은 random backoff time을 생성한 단말

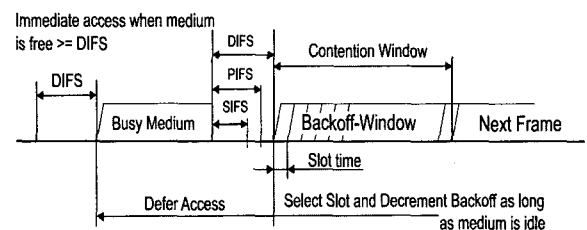


그림 1. DCF의 기본 접근 방법

Fig. 1. Basic access method in DCF.

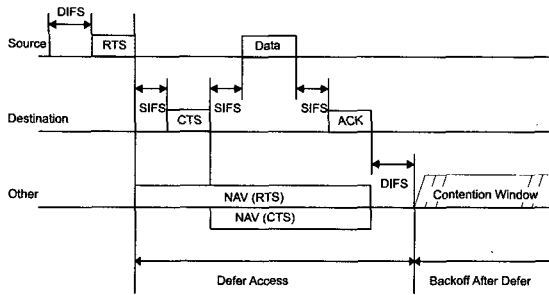


그림 2. DCF에서 RTS/CTS 방식  
Fig. 2. RTS/CTS access method in DCF.

은 매체접근에 성공하게 되고, 먼저 RTS 프레임을 전송한다. RTS 프레임에는 데이터를 전송하고자 하는 source 단말의 주소와 NAV설정에 사용되는 duration field가 포함되어 있다. RTS 프레임을 수신한 단말들 중에 destination 단말은 RTS프레임에 대한 ACK (Acknowledgement)로서 CTS 프레임을 전송하고, 나머지 단말들은 자신의 NAV를 RTS 프레임에 포함된 duration field의 값으로 설정한 뒤, NAV를 줄여나가면서 매체접근을 연기한다. RTS/CTS 프레임의 전송이 끝나면, 송신 단말은 데이터 전송을 시작하게 되고 수신 단말은 ACK 프레임을 전송한다. 모든 프레임에 duration field가 포함되어 있고, 단말들은 현재 NAV보다 더 큰 duration field를 수신할 경우에만 NAV를 갱신한다. NAV가 0이 되면, 단말들은 매체가 유휴 상태라고 판단하고 DIFS 동안 기다린 뒤 자신의 backoff time을 줄여나가면서 매체접근을 시도한다. RTS와 CTS의 사용을 통한 virtual carrier sense 방안에 의해 hidden terminal<sup>[5]</sup> 문제를 해결할 뿐만 아니라, RTS와 CTS 교환 충돌로 인한 전송 경로의 손실을 즉각적으로 확인할 수 있다. RTS/CTS 기법은 평균 패킷의 크기가 큰 환경이나 단말의 수가 많아 충돌 확률이 높은 환경에서 효율적이다.

### III. 전송량 향상을 위한 개선된 MAC 알고리즘 제안 및 성능 분석

IEEE 802.11 DCF의 포화상태에서의 전송량과 패킷 경쟁 지연시간은 수학적으로 분석되었다<sup>[6][7][8][9]</sup>. 본 장에서는 기존 IEEE 802.11 DCF에 추가적으로 새롭게 제안된 알고리즘을 설명하며, 제안된 알고리즘에 대한 포화상태에서의 전송량 및 패킷 경쟁 지연시간과 불포화 상태에서의 전송량을 수학적으로 분석하였다. 수학적 분석을 위해 고정된 단말의 개수와 전송되는 패킷에

대한 bit에러는 없다고 가정하였고, hidden terminal 문제는 없다고 가정하였다.

#### 1. 802.11 DCF+ 제안

기존 IEEE 802.11 DCF에서 각 단말은 패킷을 성공적으로 전송한 후  $CW$ 를  $CW_{min}$  값으로 감소시킨다. 충돌에 의해 높아진  $CW$ 를  $CW_{min}$  값으로 되돌릴 경우 충돌 확률이 높아지게 되며, 전송을 위해 기다리는 단말의 수가 많을 경우 충돌 확률은 더욱 높아지게 된다. 또한  $\lambda$ 가 계속 증가할 경우 불포화 상태에서 전송량이 최대 전송량까지 계속 증가하지만 포화상태에 이르게 되면 전송량이 최대 전송량보다 작은 값으로 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이 부분은 전송 후  $CW$ 를 작게 함으로써 다음 패킷이 충돌할 확률이 높아진 결과이다.

본 논문에서는 패킷을 성공적으로 전송한 후  $CW$ 를  $CW_{min}$  값으로 줄이지 않고 반으로 줄이는 알고리즘을 제안하며 이후 제안된 알고리즘을 802.11\_PLUS 라고 표기하였다. 802.11\_PLUS는  $CW$ 를 천천히 감소시킴으로써 성공적으로 전송된 패킷에 대한 충돌확률을 다음 패킷에 일부 적용하기 위한 방법이다.

#### 2. 802.11\_PLUS 패킷 전송 확률

수학적 분석을 위해 필요한 표기법은 표 1과 같다.

$b(t)$ 는 각 단말에 대한 backoff 윈도우를 stochastic process로 나타낸 것이다. 각각의 backoff 윈도우는 추상적인 정수로 표현이 가능하며,  $(t, t+1)$ 사이의 시간 간격은 최소한  $\sigma$ 보다 크다. 표 1에서  $W=CW_{min}$ 라고 정의하며,  $CW_{max}=2^m W$ 로 나타낼 수 있다. 그리고  $i=(0, m)$ 를 "backoff stage"라 하고 각 backoff stage에서  $W_i=2^i W$ 와 같이 나타낸다.  $s(t)$ 는 시간  $t$ 에서

표 1. 수학적 분석에 사용되는 표기법  
Table 1. Notation used at mathematic analysis.

표 기	설 명
$n$	전체 단말 수
$\sigma$	Slot time의 크기
$\tau$	단말이 패킷을 전송 할 확률
$CW_{min}$	최소 backoff 윈도우 크기
$CW_{max}$	최대 backoff 윈도우 크기
$m$	최대 backoff stage 크기

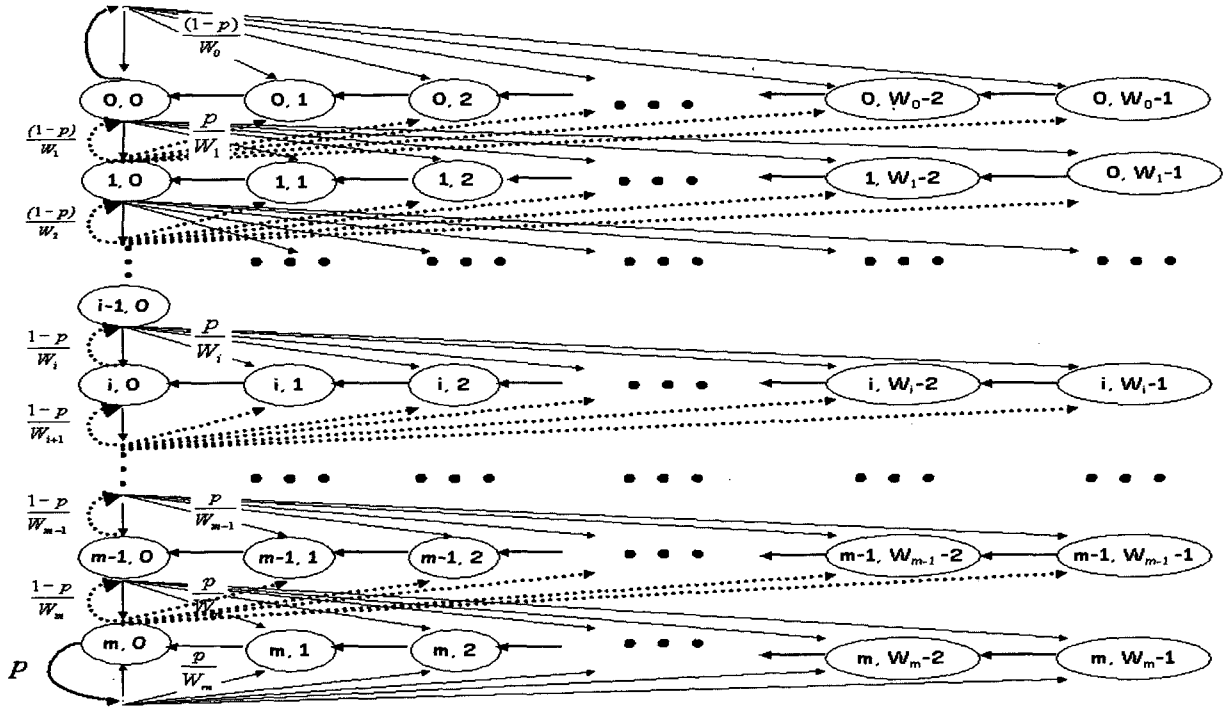


그림 3. backoff 윈도우에 대한 Markov Chain model  
Fig. 3. Markov Chain model for the backoff window size.

단말의 backoff stage를 나타낸 stochastic process이다.  $p$ 는 단말이 패킷을 전송할 경우 다른 단말에 의해서 충돌할 확률을 나타내며, 각각의 패킷은 서로 독립적이고 일정한 값을 갖는다고 가정한다.

그림 3에서 표현된 discrete-time Markov chain은 bidimensional process  $\{s(t), b(t)\}$ 로 나타낼 수 있으며, 한 스텝 이동 확률을 식 (1)과 같이 나타낸다.

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

처음 단말은 backoff stage 값을 0으로 하며,  $(0, W_0-1)$  사이의 임의의 backoff 윈도우 값을 선택하게 된다. Backoff 윈도우가 0보다 클 경우 항상 감소하게 된다. Backoff 윈도우가 0일 경우 패킷 전송을 시작하게 되며, 충돌 여부에 따라 다른 stage로 이동하게 된다. 패킷 전송이 성공하였을 경우 두 가지로 나눌 수 있다. backoff stage가 1보다 클 경우 값을 1 감소시키며, backoff stage가 0일 경우 값을 그대로 유지한다. 변경된 backoff stage를 이용해서 다음 패킷에 대한

backoff 윈도우 값을 선택하게 된다. 예로 backoff stage가  $i$ 에서 전송이 성공했을 경우 다음 패킷의 backoff 윈도우는  $(0, W_{i-1}-1)$  사이의 임의의 값을 선택하게 된다. 패킷 전송이 충돌에 의해서 실패하였을 경우에도 두 가지로 나눌 수 있다. Backoff stage가  $m$ 보다 작은 경우 값을 1증가 하며,  $m$ 과 같은 경우  $m$ 의 값을 유지한다. 충돌된 패킷을 재전송하기 위해 변경된 backoff stage를 이용해서 backoff 윈도우를 선택하게 된다.

구간  $i \in (0, m)$ ,  $k \in (0, W_i-1)$ 에서 Markov chain의 극한 확률은 식 (2)와 같으며 임의의 시간에 각 stage에 있을 확률은 식 (3)과 같다.

$$b_{i,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t) = i, b(t) = k\} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 b_{0,0} &= b_{0,0}(1-p) + b_{1,0}(1-p) \rightarrow b_1 = \frac{p}{1-p} b_0 \\
 b_{i,0} &= b_{i-1,0}p + b_{i+1,0}p \rightarrow b_{i,0} = \left(\frac{p}{1-p}\right)^i b_{0,0} \quad 0 < i < m \\
 b_{m,0} &= b_{m-1,0}p + b_{m,0}p \rightarrow b_{m,0} = \left(\frac{p}{1-p}\right)^m b_{0,0}
 \end{aligned}
 \quad (3)$$

식 (3)을 확장하여  $i$  stage에서 각각의  $k \in (1, W_i-1)$

에 대한 극한 확률을 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} \left\{ \begin{array}{l} b_{1,0} \frac{1-p}{p} \quad i=0 \\ b_{0,0} \left(\frac{p}{1-p}\right)^i \quad 0 < i \leq m \end{array} \right\} \quad (4)$$

식 (3)을 정리하면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (4)와 식 (5)를 정리하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{i=0}^m b_{i,0} = \left( \frac{(1-p) \left(1 - \left(\frac{p}{1-p}\right)^{m+1}\right)}{1-2p} \right) b_{0,0} \quad (5)$$

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} b_{i,0} \quad i \in (0, m), \quad k \in (0, W_i - 1) \quad (6)$$

임의의 시간  $t$ 에서 극한 확률  $b_{i,k}$ 를  $b_{0,0}$ 로 나타낼 수 있으므로 모든 구간에서의 확률의 합이 1임을 이용해서  $b_{0,0}$ 를 구하면 식 (7)과 같다.

$$b_{0,0} = 2 \left/ \left[ \begin{array}{l} \frac{(1-p) \left(1 - \left(\frac{2p}{1-p}\right)^{m+1}\right)}{1-3p} \cdot W \\ + \frac{(1-p) \left(1 - \left(\frac{p}{1-p}\right)^{m+1}\right)}{1-2p} \end{array} \right] \right. \quad (7)$$

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{i,0} = \frac{(1-p) \left(1 - \left(\frac{p}{1-p}\right)^{m+1}\right)}{1-2p} \times 2 \left/ \left[ \begin{array}{l} \frac{(1-p) \left(1 - \left(\frac{2p}{1-p}\right)^{m+1}\right)}{1-3p} \cdot W \\ + \frac{(1-p) \left(1 - \left(\frac{p}{1-p}\right)^{m+1}\right)}{1-2p} \end{array} \right] \right. \quad (8)$$

임의의 slot을 선택했을 경우 단말이 패킷을 전송할 확률  $\tau$ 은 backoff 윈도우가 0일 확률과 같게 되며 식 (7)을 이용해서 정리하면 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

또한, 일반적인 패킷 충돌확률  $p$ 는  $1 - (1 - \tau)^{n-1}$ 과 같으며, 이를  $\tau$ 에 관한 식으로 나타내면  $\tau^*(p) = 1 - (1 - p)^{1/(n-1)}$ 과 같이 나타낼 수 있다.  $\tau^*(p)$ 와 식 (8)을 이용해서 두 식을 만족하는  $p, \tau$ 를 구할 수 있다.

### 3. 802.11 DCF+ 전송량

전송량  $S$ 를 계산하기 위해서 임의의 slot 시간에 최

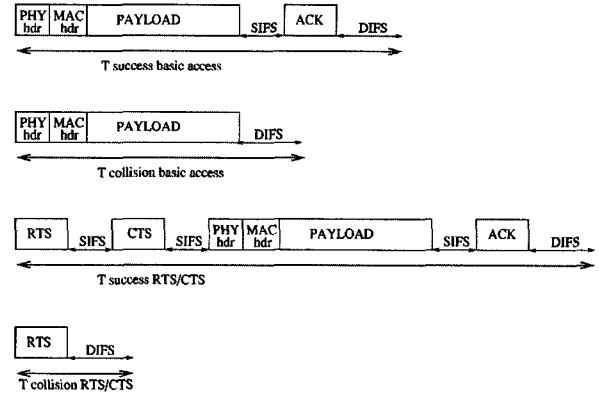


그림 4. basic access와 RTS/CTS access에서  $T_s, T_c$   
Fig. 4.  $T_s, T_c$  for basic and RTS/CTS access mechanisms.

소한 하나 이상의 단말이 패킷을 전송할 확률을  $P_{tr}$ , 하나 이상의 단말이 패킷을 전송할 조건에서 성공적으로 패킷을 전송할 확률을  $P_s$ 로 정의한다.  $P_{tr}, P_s$ 의 값을 구하면 식 (9), 식 (10)과 같다.

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^n \quad (9)$$

$$P_s = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{P_{tr}} = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{1 - (1-\tau)^n} \quad (10)$$

따라서 평균 payload 크기를  $E[P]$ 라고 하면 성공적으로 전송하는데 소요되는 slot 시간의 평균은  $P_{tr}P_sE[P]$ 로 나타낼 수 있다.  $T_s$ 는 패킷을 성공적으로 전송하는데 소요되는 평균 시간이며,  $T_c$ 는 패킷 충돌에 의해서 낭비되는 평균 시간을 나타낸다. 위의 식을 정리하면 전송량  $S$ 는 식 (11)과 같다.

$$S = \frac{P_s P_{tr} E[P]}{(1 - P_{tr})\sigma + P_s P_{tr} T_s + P_{tr}(1 - P_s) T_c} \quad (11)$$

DCF의 basic access 방법과 RTS/CTS access의 경우 성공적으로 전송한 패킷의 평균 시간  $T_s$ 와 충돌에 의해서 소비된 평균 시간  $T_c$ 에 의해서  $S$ 가 다르게 나타나게 된다. 그림 4는 basic access와 RTS/CTS access 방법에 대한 각각의  $T_s, T_c$ 를 나타낸다. 패킷의 헤더를  $H = PHY_{hdr} + MAC_{hdr}$ 로 나타내면 basic access 방법과 RTS/CTS access 방법에 대한 각각의  $T_s, T_c$  값은 식 (12)와 식 (13)과 같다.

$$\begin{aligned} T_s^{bas} &= H + E[P] + SIFS + \delta + ACK + DIFS + \delta \\ T_c^{bas} &= H + E[P^*] + DIFS + \delta \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
 T_s^{rs} &= RTS + SIFS + \delta + CTS + SIFS + \delta + H \\
 &\quad + E[P] + SIFS + \delta + ACK + DIFS + \delta \\
 T_c^{rs} &= RTS + DIFS + \delta
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

4. 포화상태에서 경쟁 지연시간

포화상태에서 성공적으로 전송된 패킷의 평균 경쟁 지연시간을  $E[D]$ 라고 정의한다. 경쟁 지연시간이란 패킷이 큐의 헤더에 입력되는 시간부터 패킷이 성공적으로 전송될 때까지의 시간을 나타낸다.  $E[X]$ 를 패킷이 성공적으로 전송되기까지 소요된 평균 slot수로 나타내면  $E[D] = E[X] \cdot E[slot]$ 으로 나타낼 수 있다.  $E[X]$ 는  $i$ 번째 backoff stage에 도달하기 위한 확률  $q_i$ 와  $i$ 번째 stage에서 패킷이 평균 소요하는 slot 시간  $d_i$ 에 의해서 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E[X] &= d_i \cdot q_i \\
 d_i &= \frac{W_i + 1}{2}, & i \in [0, m] \\
 q_i &= \begin{cases} p^i, & i \in [0, m-1] \\ \frac{p^m}{1-p}, & i = m \end{cases}
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

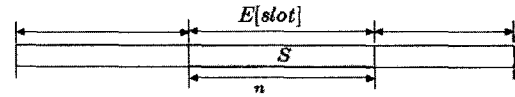
식 (14)를 정리하면  $E[X]$ 를 식 (15)와 같이 구할 수 있다.

$$E[X] = \frac{(1-2p) \cdot (W+1) + pW \cdot (1-(2p)^m)}{2 \cdot (1-2p) \cdot (1-p)} \tag{15}$$

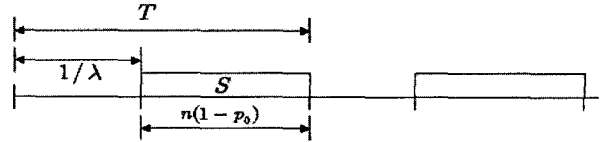
5. 불포화 상태에서 전송량화상태

불포화상태에서 전송량을 수학적으로 분석하기 위해 패킷은 Poisson arrival 트래픽 특성을 갖으며 arrival rate를  $\lambda$ 로 가정하였다. 그림 5의 a는 포화상태에서  $n$ 개의 단말 모두가 패킷을 전송하기 위해서 경쟁하게 되며,  $E[slot]$  동안 payload를 보내기 위해서 소비된 slot의 비율이  $S$ 가 된다. 불포화상태에서 임의의 단말이 전송할 패킷을 가지고 있지 않을 확률을  $p_0$ 라 하면, 전송할 패킷을 가질 확률은  $1-p_0$ 가 된다. 그림 5의 b는 불포화 상태에서의 전송량을 나타내며  $S$ 는  $n(1-p_0)$ 의 단말이 포화상태에서의 전송량을 구하는 식으로 구할 수 있다.

Arrival rate가  $\lambda$ 일 경우 평균  $1/\lambda$ 의 유희구간을 갖게 된다.  $T$ 를  $E[slot]$ 과  $1/\lambda$ 의 합으로 나타내면 불포화상태에서의 전송량은  $T$ 에 대한  $E[slot]$ 에서의 payload를 전송하기 위해 소비한 시간의 비율이 된다.



a) 포화상태에서의 전송량 계산



b) 불포화상태에서의 전송량 계산

그림 5. 포화상태와 불포화상태에서 전송량 계산  
Fig. 5. Throughput analysis in saturation and unsaturation.

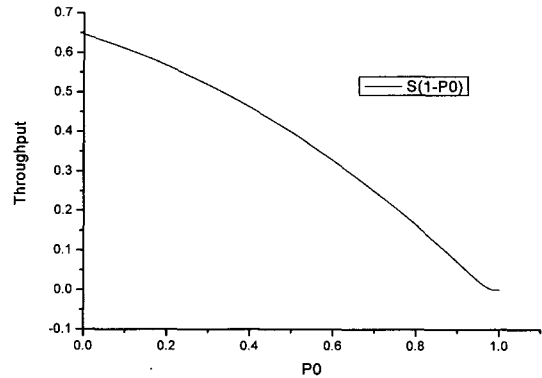


그림 6.  $p_0$  값의 변화에 따른 전송량  
Fig. 6. Throughput according to the change of  $p_0$ .

따라서 단위시간  $T$ 에 대한 전송량  $S'$ 를 구하면 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S' = \frac{S(T-1/\lambda)}{T} = S(1-p_0) \tag{16}$$

그림 6은  $p_0$  값의 변화에 따른  $S'$ 를 보여주며,  $p_0$ 가 증가할수록  $S'$ 가 감소하는 함수임을 알 수 있다.  $S'$ 와  $\lambda$ 를 비교하여 적절한  $p_0$ 를 이분검색을 이용해서 구할 수 있다.  $p_0$ 를 구하면 패킷 arrival이  $\lambda$  경우  $n(1-p_0)$ 개의 단말에 대한 포화상태에서의 전송량과 패킷 전송 시간을 구할 수 있다.

IV. 시뮬레이션 및 성능 평가

본 장에서는 기존의 802.11 DCF과 802.11\_PLUS의 전송량 및 경쟁 지연 시간을 시뮬레이션을 통해 비교 및 성능 평가하였다. 또한, 802.11\_PLUS의 수학적 분석 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 시뮬레이션을 위해 SIM++<sup>[10]</sup>과 C++을 사용해서 event-driven 방식으로

구현하였다.

시뮬레이션을 위한 자세한 파라미터는 표 2와 같다. 채널의 1Mbit/s로 가정했으며 ACK\_Timeout과 CTS\_Timeout은 표준에 정의되어 있지 않아 300 $\mu$ s로 같게 하였다. 또한 시뮬레이션을 위해 payload 크기를 8184 bit로 고정하였고, Poisson arrival traffic 분포를 가정하였다. 또한 하나의 단말이 송신시에 다른 모든 단말이 수신 가능하며, 전송시 bit 에러는 없다고 가정한다.

그림 7은 basic access 경우 단말의 수에 대한 최대 전송량을 802.11과 802.11\_PLUS을 비교하여 나타낸 그래프이다. 모든  $CW_{min}$ 과  $m$ 값에 대해서 802.11\_PLUS가 높다는 것을 볼 수 있다. 또한 802.11 경우  $n$ 이 클수록 최대 전송량이 급격히 감소하지만, 802.11\_PLUS의 경우 서서히 감소하는 것을 볼 수 있다. 그림 8은 같은 환경에서 RTS/CTS access 의 경우에 대한 그래프이다.  $CW_{min}$ 과  $m$  값의 변화에 따라 최대 전송량의 차이가 크게 나타나지 않음을 알 수 있다. RTS/CTS access의 경우 충돌에 의한 채널 효율이 패킷의 크기에 영향을 받지 않고, basic access 경우보다 충돌에 의한 채널 낭비가 크지 않기 때문에 평균 패킷 크기가 큰 환경과 충돌 확률이 높은 환경에서 채널 효율을 높일 수 있다.

그림 9와 그림 10은 위의 결과에서 발생된 평균 패킷 경쟁지연 시간을 나타낸 그래프이다. Basic access 경우 802.11은 단말의 수가 증가할 경우 패킷 경쟁지연 시간이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 802.11\_PLUS의 경우  $CW$ 는 적게 감소하지만 경쟁에서 소모되는 지연 시간이 작게 되어 채널 효율이 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 패킷 전송 성공 후에  $m$ 을 0으로 할 경우, 다음 패킷이 충돌할 확률이 높게 되므로 충돌 확률을 낮추

표 2. 시뮬레이션을 위한 파라미터  
Table 2. Parameters for the simulation.

파라미터	값
PacketPayload	8184 bits
MAC header	272 bits
PHY header	128
ACK size	112 bit + PHY header
RTS size	112 bit + PHY header
CTS size	160 bit + PHY header
CTS_Timeout	300 $\mu$ s
채널 속도	1 Mbit/s
전파지연시간	1 $\mu$ s
Slot time	50 $\mu$ s
SIFS	28 $\mu$ s
DIFS	128 $\mu$ s
ACK_Timeout	300 $\mu$ s

기 위해  $m$ 을 1 감소하는 방법이 오히려 경쟁지연 시간을 줄일 수 있다는 것을 볼 수 있다. RTS/CTS access에서 패킷 경쟁지연 시간은 기존의 802.11의 경우  $CW_{min}$ 과  $m$ 값에 대해서 크게 영향을 받지 않고 단말의 수가 증가할수록 크게 증가하지만 802.11\_PLUS의 경우의  $m$ 값에 따라 패킷 경쟁 지연 시간이 다르게 나타나며 단말의 수가 증가할수록 패킷 평균 경쟁지연시간이 천천히 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한  $m$ 이 클수록 경쟁지연 시간이 적게 나타나는 것을 알 수 있다.

802.11의 경우 basic access와 RTS/CTS access 경우 경쟁지연 시간의 차이가 크지만 802.11\_PLUS의 경우 경쟁지연 시간이 크게 나타나지 않음을 알 수 있다. 이는

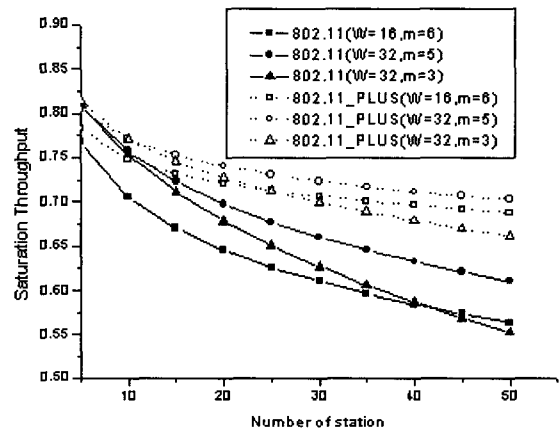


그림 7. Basic access에서 단말 수에 따른 최대 전송량  
Fig. 7. Saturation throughput for the basic access.

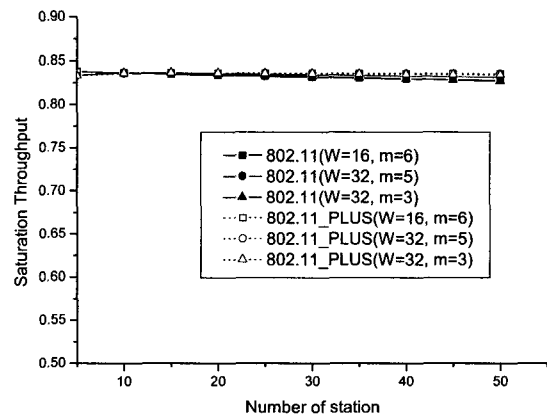


그림 8. RTS/CTS access에서 단말 수에 따른 최대 전송량  
Fig. 8. Saturation throughput for the RTS/CTS access mechanism.

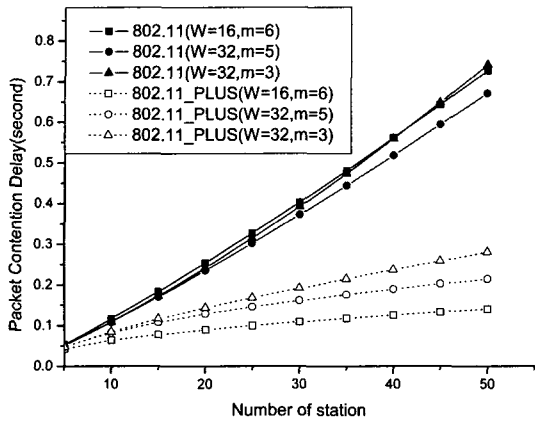


그림 9. Basic access에서 패킷 평균 지연시간  
 Fig. 9. Packet contention delay for the basic access mechanism.

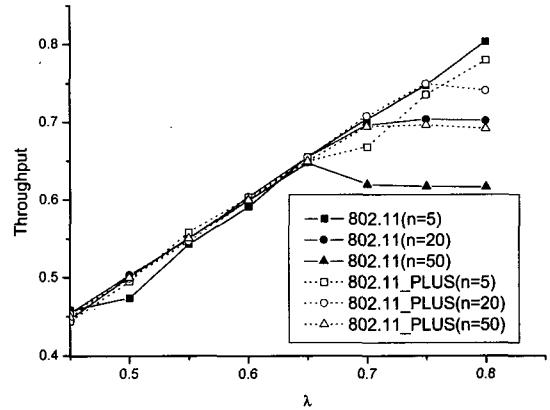


그림 11. 불포화 basic access에서 전송량  
 Fig. 11. Throughput for the basic access mechanism in unsaturation.

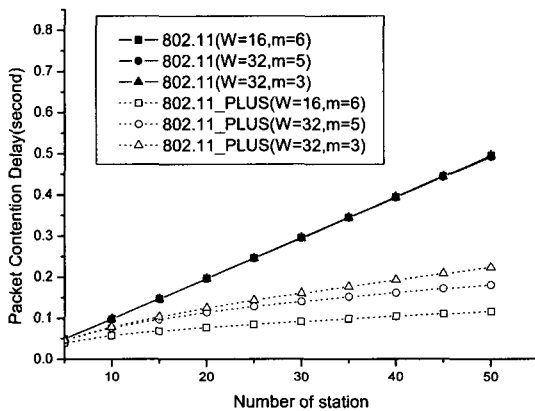


그림 10. RTS/CTS access에서 패킷 평균 지연시간  
 Fig. 10. Packet contention delay for the RTS/CTS access mechanism.

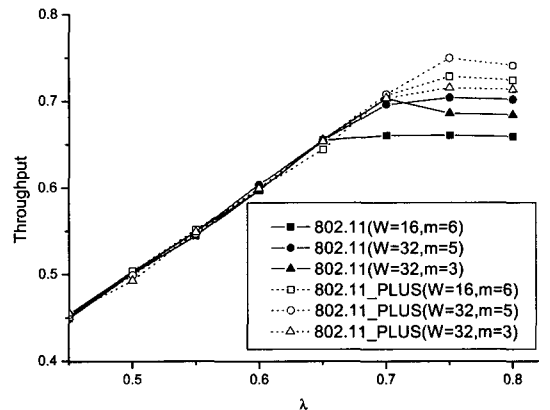


그림 12. 불포화 RTS/CTS access에서 전송량  
 Fig. 12. Throughput for the RTS/CTS access mechanism in unsaturation.

802.11\_PLUS가 basic access에서 보다 많은 채널 효율을 가져올 수 있다는 것을 볼 수 있다.

다음은 불포화상태에서  $\lambda$ 에 따른 전송량을 분석한다. 그림 11은  $CW_{min} = 32$ ,  $m = 5$ 일 경우, 단말 수에 대한 802.11과 802.11\_PLUS의 전송량을 시뮬레이션을 통해 나타낸 그래프이다. 그래프에서 전송량을 불포화상태와 포화상태로 나눌 수 있다. 불포화상태는  $\lambda$ 가 증가할수록 전송량이 증가하는 구간을 나타내며 포화상태는  $\lambda$ 가 증가해도 전송량이 증가하지 않는 구간을 나타낸다. 두 구간이 구분되는  $\lambda$ 는  $n$ 의 크기에 따라 다르게 나타나며,  $n$ 이 클 경우 충돌 확률이 높기 때문에  $n$ 이 작을 경우보다 일찍 포화상태가 된다. 그림 11에서  $n$ 이 50일 경우 가장 작은  $\lambda$ 에서 포화상태가 되고  $n$

이 5일 경우 가장 큰  $\lambda$ 에서 포화상태가 되는 것을 알 수 있다. 802.11\_PLUS의 경우 802.11에 비해 충돌 확률을 낮게 해서 같은 단말 수에 대한 불포화상태 구간이 늘어났다.  $n$ 이 50일 경우 802.11은  $\lambda$ 가 0.65에서 포화상태가 되지만, 802.11\_PLUS는 0.7이상에서 포화상태가 되는 것을 볼 수 있다. 따라서  $\lambda$ 의 크기가 큰 경우 802.11\_PLUS가 보다 높은 전송량을 나타내게 된다. 또한 802.11\_PLUS는  $n$ 이 작을 경우보다 클 경우에 보다 큰 효율을 나타낸다. 전송량의 경우  $n$ 이 20일때 0.04%가 증가되었지만  $n$ 이 50일 경우 0.075%가 증가한 것을 볼 수 있다.

그림 12는 단말의 수를 20으로 고정하였을 경우  $\lambda$ 에 따른 전송량을 나타낸 그래프이다. 802.11\_PLUS는



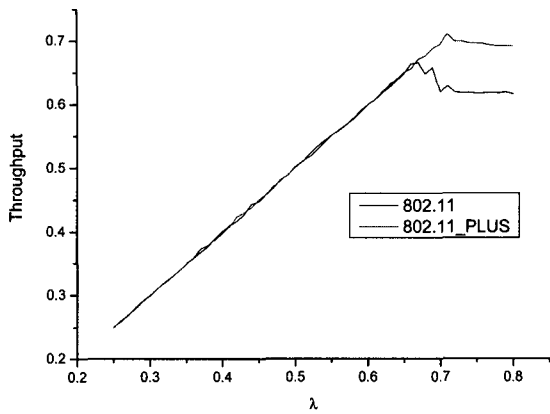


그림 13. 불포화 basic access에서 전송량 비교  
Fig. 13. Throughput for basic access mechanism in saturation and unsaturation.

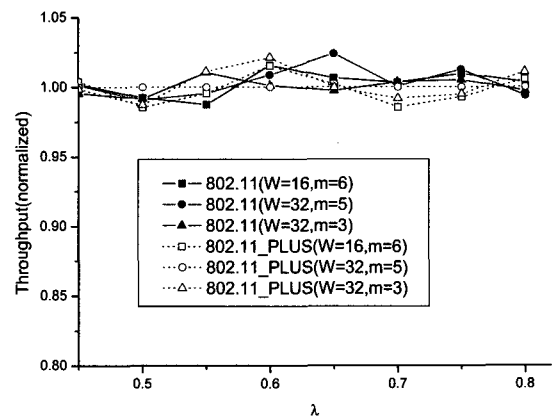


그림 15. 불포화 RTS/CTS access에서  $W, m$ 에 따른 전송량  
Fig. 15. Normalized throughput according to the  $w$  and  $m$  for the RTS/CTS access mechanism in unsaturation.

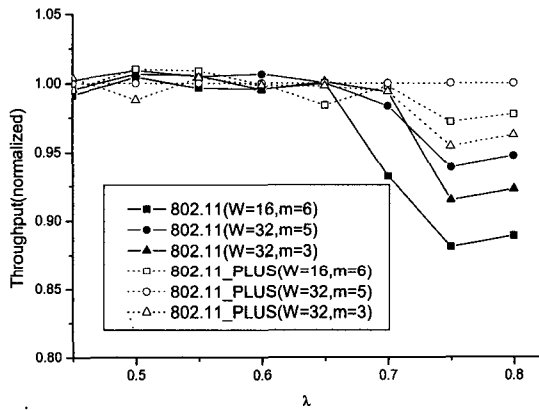


그림 14. 불포화 basic access에서  $W, m$ 에 따른 전송량  
Fig. 14. Normalized throughput according to the  $w$  and  $m$  for the basic access mechanism in unsaturation.

불포화상태에서는 802.11과 비슷하지만 포화상태에서는 향상되었다.

포화상태에서  $m$ 이 각각 3, 5, 6일 경우 각각 최대 0.03%, 0.045%, 0.07%가 향상되었음을 볼 수 있다. 그림 11과 그림12에서 시뮬레이션을 통해서 알 수 있듯이 802.11\_PLUS는포화상태 구간에서  $n$ 이 커서 충돌확률이 높은 환경과  $m$ 이 적당히 큰 경우에서 보다 높은 효율을 나타내는 것을 볼 수 있다.

그림 13은  $CW_{min} = 32, m = 5, n = 50$  환경에서 802.11과 802.11\_PLUS에 대한 전송량을 나타낸다. 802.11의 경우  $\lambda$ 가 증가할수록 최대 전송량까지 증가한 후 다시 0.05% 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이는 포화상태가 되었을 경우 패킷을 성공적으로 전송한 후에

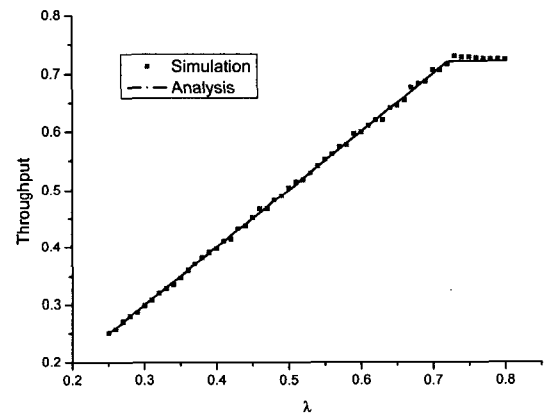


그림 16. 시뮬레이션과 수학적 분석에 따른 전송량 ( $n=20$ )  
Fig. 16. Comparison of simulation and analytical results throughput ( $n=20$ )

stage를 0으로 했을 경우 다음 패킷에 대한 충돌 확률이 높게 나타나기 때문임을 알 수 있다. 802.11\_PLUS에서는 최대 전송량에서 감소하는 부분에서 성능 향상을 보였다.

그림 14와 그림 15는 단말의 수를 20으로 고정하였을 경우 basic access와 RTS/CTS access 방법에 대한 전송량을 나타낸 그래프로 802.11\_PLUS에서  $CW_{min} = 32, m = 5$ 일 경우의 전송량을 기준으로 정규화 시킨 그래프이다.

Basic access의 경우 불포화상태에서는 비슷하게 나타나지만 포화상태에서 802.11\_PLUS의 전송량이 높게

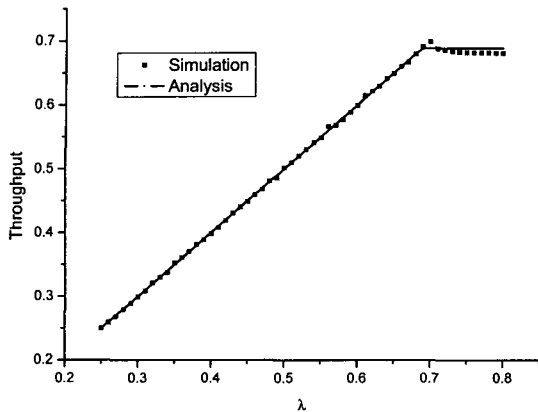


그림 17. 시뮬레이션과 수학적 분석에 따른 전송량 ( $n=50$ )

Fig. 17. Comparison of simulation and analytical results throughput ( $n=50$ ).

나타나는 것을 볼 수 있다.  $CW_{min}$ 의 값보다  $m$ 의 값에 크게 영향을 미치는 것을 볼 수 있으며,  $m$ 의 값이 클수록 802.11\_PLUS의 성능 향상이 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. RTS/CTS access의 경우  $\lambda$ 에 대한 모든 구간에서 전송량이 비슷하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 따라서 RTS/CTS access의 경우  $CW_{min}$ 과  $m$ 의 영향을 크게 받지 않는다는 것을 알 수 있다.

다음은 802.11\_PLUS basic access 방법에 대해서 수학적 분석에 의한 결과 값과 시뮬레이션을 통한 결과 값을 비교한다.  $CW_{min} = 16$ ,  $m = 6$ , payload=8184bit 환경에서 분석하였으며, 그림 16은 단말의 수가 20일 때  $\lambda$ 의 증가에 따른 전송량을 나타낸 그래프를 보여준다. 또한 그림 17은 같은 환경에서 단말의 수가 50일 경우에 대한 시뮬레이션과 수학적 분석에 의한 결과 값을 비교한 그래프로써 두 결과 값이 상당히 일치하는 것을 볼 수 있다.

## V. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 기존의 IEEE 802.11 DCF에서 성공적인 패킷 전송 후에  $CW = CW_{min}$ 으로 급격히 감소시키지 않고 서서히 감소시키는 802.11 DCF\_PLUS를 제안하였다. 802.11 DCF\_PLUS는 단말이 많은 환경에서 단말간의 충돌 확률을 낮게 하여 채널 효율을 높일 수 있고,  $m$ 이 클 경우 높은 성능향상을 나타내는 것을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다.

또한, 포화상태에서 전송량이 최대 전송량보다 적게

나타나는 부분을 보완하였으며 불포화 상태의 환경에서도 IEEE 802.11 DCF에 비교해서 나쁘지 않음을 확인할 수 있었다. 802.11 DCF\_PLUS 포화상태에서의 전송량을 수학적으로 분석하였으며, 이를 이용해서 불포화 상태에서 임의의  $\lambda$ 에 대해서 전송량을 수학적으로 분석하였다. 모든  $\lambda$ 에 대해 시뮬레이션과 수학적 분석이 일치함을 보였다.

본 연구 결과를 바탕으로 진행할 향후 연구과제로는 802.11 DCF 유한 큐에서의 전송량과 패킷 지연시간에 대한 수학적 성능 분석을 진행할 것이다. 또한 우선 순위가 서로 다른 다양한 트래픽을 위한 우선순위 다중 큐의 환경에서 각 트래픽에 대한 전송량과 패킷 지연시간을 수학적으로 분석할 것이다. 그리고 여러 환경을 고려하여 각 환경에서의 각 클래스별 트래픽에 대한 적정 파라미터에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

## 참고 문헌

- [1] The Editors of IEEE 802.11. IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, Nov. 1997.
- [2] H. S. Chhaya and S. Gupta, "Performance modeling of asynchronous data transfer methods of IEEE 802.11 MAC protocol", Wireless Networks, vol. 3 (1997), pp. 217-234, 1997.
- [3] T. S. Ho and K. C. Chen, "Performance evaluation and enhancement of the CSMA/CA MAC protocol for 802.11 wireless LAN's," in Proc. IEEE PIMRC, Taipei, Taiwan, pp. 392-296, Oct. 1996.
- [4] F. Cali, M. Conti, and E. Gregori, "IEEE 802.11 wireless LAN: Capacity analysis and protocol enhancement", presented at the INFOCOM'98, San Francisco, CA, Mar. 1998.
- [5] L. Kleinrock and F. Tobagi, "Packet switching in radio channels, Part-II The Hidden Terminal Problem in Carrier Sense Multiple Access Models and the Busy Tone Solution", IEEE Trans. Comm, vol. 23, no. 12, pp. 1417-1433, Dec. 1975.
- [6] G. Bianchi, L. Fratta, and M. Oliveri, "Performance analysis of IEEE 802.11 CSMA/CA medium access control protocol", in Proc. IEEE PIMRC, Taipei, Taiwan, pp. 407-411, Oct. 1996.
- [7] H. Wu, Y. Peng and K. Long, "Performance of reliable transport protocol over IEEE 802.11

- wireless LAN: analysis and enhancement", in Proc. INFOCOM 2002, pp. 599-607, Jun 2002.
- [8] G. Bianchi, "Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function", IEEE J. Selected Areas in Comm, vol. 18, no. 3, pp. 535-547, 2000.
- [9] P. Chatzimisios, A. C. Boucouvalas and V. Vitsas, "Packet Delay Analysis of the IEEE 802.11 MAC Protocol", IEE Electronics Letters, vol. 39, issue 18, pp. 1358-1359, Sep. 2003.
- [10] URL:<http://www.cise.ufl.edu/~fishwick/simpack/simpack.html>

저 자 소 개



황 안 규(학생회원)  
 1999년 한남대학교 물리학과  
 학사  
 2004년 충남대학교 정보통신  
 공학과 석사  
 2005년~현재 충남대학교  
 정보통신공학과 박사과정

<주관심분야: 이동통신 네트워크, 데이터 통신,  
 초고속 통신>



이 재 용(정회원)  
 1988년 서울대학교 전자공학과  
 학사  
 1990년 한국과학기술원 전기 및  
 전자공학과 석사  
 1995년 한국과학기술원 전기 및  
 전자공학과 박사

1990년~1995년 디지콤 정보통신연구소  
 선임연구원  
 1995년~현재 충남대학교 정보통신공학부 부교수  
 <주관심분야 : 초고속통신, 인터넷, 네트워크 성  
 능분석>



김 병 철(정회원)  
 1988년 서울대학교 전자공학과  
 학사  
 1990년 한국과학기술원 전기 및  
 전자공학과 석사  
 1996년 한국과학기술원 전기 및  
 전자공학과 박사

1993년~1999년 삼성전자 CDMA 개발팀  
 1999년~현재 충남대학교 정보통신공학부  
 부교수  
 <주관심 분야: 이동인터넷, 이동통신 네트워크,  
 데이터통신>