

## 패킷 손실을 갖는 유한 로드 802.11 무선 랜의 모델링과 성능분석

최창원\*

### Modeling and Performance Analysis of Finite Load 802.11 WLAN with Packet Loss

Chang-Won Choi \*

#### 요약

CSMA/CA 프로토콜에 기반을 둔 DCF를 사용하여 공유 전송 매체 접근을 제어하는 IEEE 802.11 프로토콜은 현재 가장 많이 사용되고 있는 무선 랜 표준이다. 본 논문에서는 이러한 802.11 무선 랜에서 유한 트래픽 조건과 최종 백오프 단계에서 전송에 실패한 패킷에 대한 손실을 가정하여, 스테이션의 상태에 대한 마코프 모델을 제안하고 임의의 시점에서의 전송 확률을 구하는 알고리즘과 채널 전송 처리 방법을 유도한다. 또한 시뮬레이션을 통하여 모델을 검증하고, 패킷 손실이 없는 경우와 성능을 비교한다.

#### Abstract

A Markov model for the IEEE 802.11 standard which is the most widely deployed wireless LAN protocol, is designed and the channel throughput is evaluated. The DCF of 802.11, which is based on CSMA/CA protocol, coordinates transmissions onto the shared communication channel. In this paper, under a finite load traffic condition and the assumption of packet loss after the final backoff stage, We present an algorithm to find the transmission probability and derive the formula for the channel throughput. The proposed model is validated through simulation and is compared with the case without packet losses.

▶ Keyword : IEEE802.11표준(IEEE802.11 standard), 유한 트래픽(finite load traffic)  
DCF(Distributed Coordination Function)

• 제1저자 : 최창원

• 접수일 : 2005.06.21, 심사완료일 : 2005.07.25

\* 한신대학교 정보시스템공학과 부교수

※ 이 논문은 2005년도 한신대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## 1. 서론

무선 통신은 지난 십 여 년 동안 가장 빠른 성장을 해온 IT 기술이다. 여러 대의 PC와 주변장치가 전용의 통신 회선을 통하여 연결되어 있는 통신 네트워크인 근거리 통신망(LAN)도 예외는 아니어서, 이제는 사무실이나 건물 내부, 대학 캠퍼스 등과 같이 비교적 가까운 지역에서는 케이블 없이도 인터넷에 접속할 수 있는 무선 LAN이 점차 보편화되고 있다. IEEE에서 제안한 802.11 표준은 이러한 무선 LAN의 물리적(PHY) 계층과 매체 접근 제어(MAC) 계층 규격을 제시하고 있다[1]. 무선 이더넷(Ethernet)이라 불리기도 하는 IEEE 802.11 표준은 현재 가장 보편적으로 사용되고 있는 무선 LAN 표준이다. 멀티미디어 데이터의 증가에 따라, 최근에는 서로 다른 우선 순위를 가지는 다양한 클래스의 트래픽에 대한 QoS를 보장하는 새로운 IEEE 802.11e 표준이 제안되기도 하였다[2].

802.11 MAC 프로토콜은 DCF(Distributed Coordination Function)라 불리는 방식을 이용하여 공용 전송 매체(media) 접근을 제어하는데, 이러한 DCF는 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 프로토콜을 이용하는 임의 접근 방식에 기반을 두고 있다. CSMA/CA 방식은 패킷 전송을 원하는 스테이션으로 하여금 유휴 채널을 DIFS(Distributed InterFrame Space)라 불리는 일정 시간 동안 먼저 관찰하게 한 후, 다시 랜덤한 시간만큼 기다린 후 전송을 시도하게 한다. 전송된 패킷의 충돌여부를 알지 못하는 무선 환경에서는 ACK 컨트롤 프레임의 수신 여부로 충돌 여부를 대체하며, 정해진 시간동안 ACK를 수신하지 못하면 백오프를 실시한다.

IEEE 802.11 표준이 제안된 이래 이에 대한 성능 분석(performance analysis)에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 그 중 가장 대표적인 연구는 Bianchi의 연구[3]로서, 그는 포화 상태(saturation condition)에서의 DCF 전송 처리 능력(throughput)을 간결한 마코프 모형에서 유도하였다. Bianchi의 모형은 백오프 단계와 백오프 카운터로 이루어진 이차원 마코프 모형으로서, 이 후 많은 연구에서 Bianchi의 모형이 확장되었다[4][5][6] [7]. 하지만 포화 상태 조건 하에서는 각 스테이션의 대기 열에 항상 전송할 패킷이 존재하

며 따라서 패킷의 도착 분포는 중요하지 않게 된다. 실제로는 스테이션의 대기 열에 전송할 패킷이 없는, 스테이션의 유휴 상태도 가능하다. 이러한 유한 트래픽(finite load traffic) 가정하에서의 DCF 연구로는 [8][9]가 있다.

본 논문에서는 기본 DCF방식을 채택하는 무선 LAN에서의 각 스테이션의 상태를 유한 트래픽 가정하에서 모델링하고 이에 따른 성능 분석을 실시한다. 제안된 모델 역시 Bianchi 계열의 모형이라 할 수 있지만, 본 모델은 다음의 두 가지 관점에서 Bianchi의 모델과 뚜렷이 차별화된다. 첫째, 포화 상태를 가정하지 않음으로 인해서 생기는 스테이션의 유휴 상태를 모형에서 고려하였으며, 둘째 세션(session) 개념을 도입하였다. 세션이란 스테이션의 비어있는 전송 패킷 대기열에 새로운 패킷이 도착하는 순간부터 다시 대기열이 비어 있게 될 때까지의 기간으로서, 이산 구간에서 시스템을 관측하는 본 모형의 특성상, 특히 한 세션의 첫 번째 패킷이 경험하는 DIFS에 대한 조심스런 처리가 반드시 필요하게 되는데 이를 DIFS의 동기화(synchronization) 상태로 본 모형에서는 다루고 있다. 제안된 모형이 Zaki and El-Hadidi의 모형과 구별되는 점은 시스템이 슬롯 타임 단위로 모형화되었지만 이는 적절치 않다고 판단된다. 연관된 기존의 연구[10][11]에서는 최대 백오프 단계에서 전송에 실패한 패킷이 계속 최대 백오프 단계에 머물면서 전송을 시도하므로 패킷 손실(loss)이 전혀 발생하지 않는다고 가정하였다. 그러나, 본 모형에서는 최대 백오프 단계에서 전송에 실패한 패킷은 더 이상 전송을 시도하지 않고 손실되는 경우를 모형화하였다. 이러한 상황은 앞서 언급한 IEEE802.11e 표준에서와 같이 서로 우선순위가 다른 데이터의 QoS 보장을 위하여 고려할 수 있기 때문이다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 먼저 2장에서는 기본 DCF 방식을 간략하게 정리하고, 3장에서는 모형의 설정과 그에 따른 상태 방정식의 유도, 그리고 전송 처리 능력을 유도하기 위한 확률들을 계산하기 위한 수치 해석적 알고리즘을 제시한다. 그리고 4장에서는 제안된 수치 해석적 방법의 타당성을 시뮬레이션 결과와 비교하여 입증하고, 패킷 손실을 가정하지 않은 경우와 비교하여 분석한다. 마지막으로 5장에서는 결론과 향후 연구 과제를 제시한다.

## II. 기본 DCF 방식

IEEE 802.11 MAC 프로토콜은 두 가지 패킷 전송 방식을 제공한다. 첫 번째는 ACK 송수신만이 제공되는 기본 접근 방식(basic access mechanism)이며, 두 번째는 전송 전 먼저 RTS/CTS 컨트롤 프레임 교환함으로써 가상적으로 채널을 예약하는 기법으로 이는 선택적으로 사용할 수 있다. 본 연구에서 분석하고자 하는 기본 접근 방식을 채택하는 DCF는 다음과 같이 작동한다. 전송할 패킷이 도착한 스테이션은 먼저 채널 상태를 모니터링하여, 만일 채널이 DIFS 동안 유희하면 바로 전송을 시작한다. 그러나, 패킷이 도착한 시점에서나 DIFS 동안 기다리는 중에 채널상의 전송이 감지되면, 스테이션은 채널이 DIFS동안 유희할 때까지 기다렸다가 백오프 절차를 수행한다.

백오프 기법은 공유 매체에 접근하고자 하는 여러 스테이션이 경쟁하는 경우 혼잡을 제어하는데 흔히 사용하는 기법으로 슬롯 타임 단위로 작동한다. 백오프를 실시하기 위해서는 먼저 백오프 윈도우에서 임의의 값을 선택하여 채널이 유희한 동안은 이 백오프 카운터값을 매 슬롯의 끝에 1씩 감소시킨다. 카운터 값이 제로가 될 때까지도 채널이 유희하면 비로소 전송을 시작한다. 이 때, 백오프 윈도우는 그 시점까지 해당 패킷이 몇 번이나 충돌하였는지에 따라 결정되는데, 충돌이 발생할 때마다 백오프 단계는 올라가고 백오프 윈도우의 크기는 두 배로 설정된다. 이미  $(m-1)$ 번의 충돌을 경험한 패킷은  $m$ 번째 백오프 단계를 실시하는데, 이 때 백오프 윈도우  $W_m$ 은

$$W_m = \min(2^{m-1}W_{\min}, W_{\max})$$

로 주어지며, 여기서  $W_{\min}$ 은 최소 백오프 윈도우 크기이며  $W_{\max}$ 는 최대 윈도우 크기이다. 만일, 백오프 중 채널에 전송이 감지되면 즉시 백오프 절차를 멈추고("freeze") 채널이 유희할 때까지 기다렸다가 남은 백오프를 실시한다.

패킷을 수신한 스테이션은 SIFS(Short InterFrame Space)후에 ACK 패킷을 전송하고, 이 ACK 패킷을 수신한 송신 스테이션은 전송이 성공하였음을 알고 다음 패킷의 전송을 준비한다.

SIFS는 DIFS보다 훨씬 짧은 구간(흔히  $28 \mu\text{s}$  vs  $128 \mu\text{s}$ )이므로 패킷을 송신한 스테이션은 다른 스테이션들이 DIFS를 완료하기 전에 ACK 패킷을 수신하는 것이 가능하다. 만일 지정된 시간(ACK time-out)동안 ACK를 수신하지 못하면 송신 스테이션은 충돌을 짐작하고 백오프의 단계를 올리게 된다. 한편, 최대 백오프 단계  $M$ 에 도달한 패킷은 더 이상의 전송을 포기하고 손실되게 된다. 일단 성공 전송이 일어난 스테이션은 백오프 윈도우를  $W_{\min}$ 로 재설정한다.

## III. 제안된 모형과 분석

네트워크에는  $N$ 개의 스테이션이 기본 DCF방식을 이용하여 공유 전송 매체를 통하여 패킷을 전송한다고 가정한다. 각 스테이션의 상태는 채널 상태와 전송 대기열에 있는 패킷의 수에 따라 결정되며, 각 스테이션의 행동은 독립적으로 결정된다. 각 스테이션을 채널의 상태에 따라 다음 세 종류의 이산 시점으로 구분하여 관측한다. 채널을 통한 전송이 일어나고 있는 경우는 전송이 시작된 시점에서부터 그에 따른 부수적인 동작이 모두 처리될 때까지이다.

즉, 성공전송의 경우는 (패킷 전송 시간 + SIFS + ACK + DIFS)이 하나의 이산 구간을 형성하며, 충돌전송의 경우는 (패킷 전송 시간 + DIFS)가 하나의 이산 구간이 된다. 채널을 통한 전송이 일어나지 않으면 하나의 슬롯이 하나의 이산구간을 형성하며, 이 때 한 슬롯의 길이를  $\delta$ 라고 가정한다. 분석을 위하여 이러한 세 종류의 이산 구간을 모두 슬롯 단위로 환산할 필요가 있는데, 먼저 하나의 DIFS는  $D$ 개의 슬롯으로 구성되어 있다. 순수하게 패킷 전송에만 소요되는 시간이  $t_c$  슬롯이라고 하고,  $t_s$ 는 (패킷 전송 시간 + SIFS + ACK)의 슬롯 수라고 하면, 성공 전송의 경우,  $(t_s + D)$ 슬롯이 경과한 후 시스템을 관찰하며, 충돌 전송의 경우는  $(t_c + D)$ 슬롯 후 관찰한다.

임의의 시점에서 각 스테이션은 아래와 같이 세 종류로 분류될 수 있는 상태들 중 하나에 속한다.

(S1)  $I$  : 전송할 패킷이 없는 상태

(S2)  $(S, I)$  : 하나의 세션이 시작된 후 첫 번째 패킷이  $I$  슬롯을 경험하면 첫 번째 DIFS가 완료되는 상태, 단,  $I=0, 1, \dots, (D-1)$

(S3)  $(n, m, I)$  : 스테이션의 대기열에는  $n$ 개의 패킷이 전송을 기다리고 있고, 현재 스테이션은  $m$ 번째 백오프 과정을 수행 중이며, 백오프 카운터는  $I$  인 상태.

단,  $I=0, \dots, (W_m-1), m=1, \dots, M$   
 $n=1, 2, 3, \dots$

전송 패킷에 대한 포화상태를 가정하지 않았으므로 각 스테이션은 전송해야 할 패킷이 없는 상태에 있을 수 있는데, 이 상태가 스테이션의 유휴상태, 즉 상태  $\{S1\}$ 이다. 하나의 슬롯 시간동안 스테이션이 상태  $I$ 를 벗어날 확률을  $\lambda$ 라 하고 스테이션이 상태  $I$ 를 벗어나는데 걸리는 슬롯의 수는 기하 분포를 따른다. 스테이션의 비어있는 전송 패킷 대기열에 새로운 패킷이 도착하는 순간부터 다시 대기열이 비어 있게 될 때까지의 기간을 세션이라 정의하고, 한 세션동안 전송할 패킷이  $n$ 개일 확률을  $f_n$ 이라 하자. 이 때, 한 세션 동안 전송되는 평균 패킷수를  $\bar{P}$ 라 정의하면,  $\bar{P}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{P} = \sum_{n=1}^{\infty} n f_n \quad \text{단,} \quad \bar{f}_n = \sum_{j=n}^{\infty} f_j$$

앞에서 정의한 세 종류의 이산 시점에서만 관측하므로, 전송 상태를 벗어난 후 시스템을 관측할 때는 새로운 세션의 첫 번째 DIFS의 일부를 이미 경험한 상태이다. 따라서 우리는 첫 번째 패킷의 DIFS에 대하여 일종의 동기화(synchronization)를 해 줄 필요가 생기게 된다. 따라서, (S2)상태가 도입되었다. 즉, 상태  $(S, I)$ 은 세션의 첫 번째 패킷이 이미  $(D-I)$  슬롯을 경험하여 DIFS의 완료를 위해서는 나머지  $I$  슬롯만 경험하면 되는 상태를 일컫는다. 한편, 패킷이 도착한 후 채널에서의 전송을 관찰한 스테이션은

유휴 채널을 DIFS동안 관찰한 후, 채널에 아무런 전송이 없는 동안은 백오프 절차를 수행해야 한다. 앞에서 설명한 바와 같이 백오프 카운터가 영이 되면 스테이션은 전송을 시도하고 충돌 전송의 경우는 백오프 단계를 증가시킨다. 미리 지정된 최대 백오프 단계에서도 전송에 성공하지 못한 패킷은 더 이상 전송을 포기하고 손실(loss)된다고 가정하였다.

이제  $X_f, X_{Sf}, X_{nmI}$  을 주어진 스테이션이 평형상태에서 각각  $I, (S, I), (n, m, I)$  상태에 있을 확률이라고 하자. 전송 확률,  $\tau$  를 임의의 이산 구간동안 스테이션이 패킷을 전송할 극한 확률로 정의하면, 전송은 백오프 카운터가 영(0)일 때 일어나므로

$$\tau = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^M X_{n, m, 0}$$

으로 표현된다. 또한, 주어진 스테이션을 제외한 나머지  $(N-1)$  스테이션 중에서 정확히  $k$ 개의 스테이션(들)만 전송을 시작할 확률을  $p_k$ 라 하고,  $\bar{p}_k$ 는  $k$ 개 이상의 스테이션(들)이 전송을 시작할 확률이라 정의하면, 이러한 확률들은 전송확률  $\tau$ 를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$p_0 = (1-\tau)^{N-1} \dots \dots \dots (3.1)$$

$$p_1 = (N-1)\tau(1-\tau)^{N-2} \dots \dots \dots (3.2)$$

$$\bar{p}_1 = 1 - (1-\tau)^{N-1} \dots \dots \dots (3.3)$$

$$\bar{p}_2 = 1 - (1-\tau)^{N-1} - (N-1)\tau(1-\tau)^{N-2} \dots (3.4)$$

모형에 대한 상태 방정식(BE1) - (BE3)을 유도한다. 상태의 전이 다이어그램은 지나치게 복잡하여 여기서는 생략한다.

성공전송을 마친 스테이션과 마지막 백오프 단계에서 전송이 실패한 스테이션, 그리고 계속 유휴 상태에 있었던 스테이션이 채널 상태를 고려한 해당 이산 구간동안 패킷 도착이 없으면 여전히 상태  $I$ 에 머물게 된다.

(BE1)

$$\begin{aligned}
 X_I &= \sum_{m=1}^M X_{1,m0} \times p_0 \times (1-\lambda)^D \\
 &+ X_{1,M0} \times \bar{p}_1 \times (1-\lambda)^D \\
 &+ X_I \times p_0 \times (1-\lambda) \\
 &+ X_I \times p_1 \times (1-\lambda)^{t_s+D} \\
 &+ X_I \times \bar{p}_2 \times (1-\lambda)^{t_c+D}
 \end{aligned}$$

세션의 마지막 패킷을 전송한 스테이션과 유휴 상태에 있다가 새로운 패킷이 도착한 스테이션, 그리고 동기화 상태에서 카운터 값을 1 감소시킨 스테이션이 동기화 상태 (S<sub>l</sub>)에 진입한다.

(BE2)

$$\begin{aligned}
 X_{S,D-1} &= \sum_{m=1}^M X_{1,m0} \times p_0 \times (1-\lambda)^{D-1} \lambda \\
 &+ X_{1,M0} \times \bar{p}_1 \times (1-\lambda)^{D-1} \lambda \\
 &+ X_I \times p_0 \times \lambda \\
 &+ X_I \times p_1 \times (1-\lambda)^{t_s+D-1} \times \lambda \\
 &+ X_I \times \bar{p}_2 \times (1-\lambda)^{t_c+D-1} \times \lambda \\
 X_{S,l} &= \sum_{m=1}^M X_{1,m0} \times p_0 \times (1-\lambda)^l \lambda \\
 &+ X_{1,M0} \times \bar{p}_1 \times (1-\lambda)^l \lambda \\
 &+ X_{S,l+1} \times p_0 \\
 &+ X_I \times p_1 \times (1-\lambda)^{t_s+l} \times \lambda \\
 &+ X_I \times \bar{p}_2 \times (1-\lambda)^{t_c+l} \times \lambda \\
 \text{단, } l &= 0, 1, \dots, D-2
 \end{aligned}$$

(m-1)번째 백오프 단계에서 충돌 전송을 한 스테이션과 m번째 백오프 단계에서 카운터를 1 감소시킨 스테이션이 (n, ml) 상태에 돌입한다.

(BE3-m)

$$\begin{aligned}
 X_{n,ml} &= X_{n,m-1,0} \times \bar{p}_1 \times \frac{1}{W_m} + X_{n,m,l+1} \\
 \text{단, } m &= 2, \dots, M \quad l = 0, 1, \dots, W_m - 2.
 \end{aligned}$$

성공 전송을 한 스테이션과 최대 백오프 단계에서 실패 전송을 한 스테이션, 그리고 새로운 세션을 시작하는 스테이션들이 (n, l) 상태에 돌입한다.

(BE3-1)

$$\begin{aligned}
 X_{n,1,W_1-1} &= \sum_{m=1}^M X_{n+1,m0} \times p_0 \times \frac{1}{W_1} \\
 &+ X_{n+1,M0} \times \bar{p}_1 \times \frac{1}{W_1} \\
 &+ X_{S,0} \times p_0 \times f_n \times \frac{1}{W_1} \\
 &+ \sum_{l=0}^{D-1} X_{S,l} \times \bar{p}_1 \times f_n \times \frac{1}{W_1} \\
 &+ X_I \times p_1 \times \sum_{k=1}^{t_s} (1-\lambda)^{k-1} \lambda \times f_n \times \frac{1}{W_1} \\
 &+ X_I \times \bar{p}_2 \times \sum_{k=1}^{t_c} (1-\lambda)^{k-1} \lambda \times f_n \times \frac{1}{W_1} \\
 X_{n,1,l} &= \sum_{m=1}^M X_{n+1,m0} \times p_0 \times \frac{1}{W_1} \\
 &+ X_{n+1,M0} \times \bar{p}_1 \times \frac{1}{W_1} \\
 &+ X_{S,0} \times p_0 \times f_n \times \frac{1}{W_1} \\
 &+ \sum_{l=0}^{D-1} X_{S,l} \times \bar{p}_1 \times f_n \times \frac{1}{W_1} \\
 &+ X_I \times p_1 \times \sum_{k=1}^{t_s} (1-\lambda)^{k-1} \lambda \times f_n \times \frac{1}{W_1} \\
 &+ X_I \times \bar{p}_2 \times \sum_{k=1}^{t_c} (1-\lambda)^{k-1} \lambda \times f_n \times \frac{1}{W_1} \\
 &+ X_{n,1,l+1} \\
 \text{단, } l &= 0, 1, \dots, W_1 - 2
 \end{aligned}$$

이제 위의 상태 방정식으로부터 전송확률  $\tau$ 를 계산하기 위한 수치 해석적 알고리즘을 유도하기 위해서는 다음과 같이 극한 확률들을 재정리할 필요가 있다. 먼저 상태 방정식 (BE3-m)을 정리하면

$$x_{nml} = x_{nM-1,0} \times \bar{p}_1 \times \frac{W_{M-l}}{W_M}$$

$$x_{nM-1,l} = x_{nM-2,0} \times \bar{p}_1 \times \frac{W_{M-1-l}}{W_{M-1}}$$

$$x_{nml} = x_{n1,0} \times (\bar{p}_1)^{m-1} \times \frac{W_m-l}{W_m}$$

이 된다. 한편, 상태 방정식 (BE3-1)으로부터

$$x_{n1,0} = c_0 \times \bar{f}_n$$

$$x_{n1,l} = x_{n1,0} \times \frac{W_{1-l}}{W_1}$$

$$x_{nml} = x_{n1,0} \times (\bar{p}_1)^{m-1} \times \frac{W_m-l}{W_m}$$

단,

$$c_0 = x_{s0} p_0 + \left( \sum_{l=0}^{D-1} x_{sl} \right) \bar{p}_1$$

$$+ x_l (p_1 [1 - (1-\lambda)^{t_s}] + \bar{p}_2 [1 - (1-\lambda)^{t_c}])$$

..... (3.5)

이 된다. 극한 확률  $x_{1,1,0}$ 는  $x_l$ 를 이용하여

$$x_{1,1,0} = \frac{x_l}{(1-\lambda)^D} \times \left[ 1 - p_0(1-\lambda) \right.$$

$$\left. p_1(1-\lambda)^{t_s+D} - \bar{p}_2(1-\lambda)^{t_c+D} \right]$$

..... (3.6)

으로 표현된다. 동기화 상태의 극한 확률 역시  $x_{1,1,0}$ 을 이용하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$x_{s,D-1} = \lambda [ x_{1,1,0} + x_l p_1 (1-\lambda)^{t_s}$$

$$+ x_l \bar{p}_2 (1-\lambda)^{t_c} ] \times (1-\lambda)^{D-1} + x_l p_0 \lambda$$

..... (3.7)

$$x_{sl} = \lambda [ x_{1,1,0} + x_l p_1 (1-\lambda)^{t_s}$$

$$+ x_l \bar{p}_2 (1-\lambda)^{t_c} ] \frac{1 - [(1-\lambda)p_0]^{D-l}}{1 - (1-\lambda)p_0} (1-\lambda)^l$$

$$+ \lambda x_l p_0^{D-l} \dots \dots \dots (3.8)$$

여기서,  $l = 0, 1, \dots, D-2$  이다. 이미 앞에서 설명한 바와 같이  $\tau = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^M x_{n,m,0}$  이므로, 전송 확률을 다시 정리하면

$$\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^M x_{n,m,0} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^M x_{n1,0} \times (\bar{p}_1)^{m-1}$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} x_{n1,0} \frac{1 - (\bar{p}_1)^M}{1 - \bar{p}_1}$$

$$= \frac{1 - (\bar{p}_1)^M}{1 - \bar{p}_1} \sum_{n=1}^{\infty} c_0 \times \bar{f}_n = (c_0 \bar{P}) \frac{1 - (\bar{p}_1)^M}{1 - \bar{p}_1}$$

이 된다.

이제 전송 확률  $\tau$ 에 대한 임의의 초기 값에서 시작하여, 그 값이 수렴할 때까지 매 단계마다 전송 확률을 업데이트 시키는 수치 해석적 알고리즘은 아래와 같이 주어진다.

▣ 알고리즘

[Step 1]

$$\tau_{\min} = 0.0 \quad \tau_{\max} = 1.0 \quad \tau = 0.5(\tau_{\min} + \tau_{\max})$$

[Step 2]

주어진  $\tau$ 를 이용하여 (3.1)-(3.4)식으로부터  $p_0, p_1, \bar{p}_1, \bar{p}_2$ 를 계산한다.

[Step 3]

$x_I=1$ 로 두고 (3.6)-(3.8)을 이용하여 극한 확률들을 구한 후 (3.5)를 이용하여  $c_0$ 를 구한다. 다음과 같이 극한 확률의 합  $\alpha$ 를 계산하여  $\tau_{new}$ 를 재계산한다.

$$\alpha = x_I + \left( \sum_{s=1}^{D-1} x_{s,I} \right) + (c_0 \bar{P}) \left( \sum_{m=1}^M (\bar{p}_1)^{m-1} \frac{W_m + 1}{2} \right)$$

$$\tau_{new} = \frac{c_0 \bar{P}}{\alpha} \frac{1 - (\bar{p}_1)^M}{1 - \bar{p}_1}$$

[Step 4]

$\tau_{min}, \tau_{max}, \tau$ 를 다음과 같이 업데이트한다.

만일  $\tau_{new} < \tau$ 이면

$$\tau_{max} = \tau \quad \& \quad \tau = 0.5(\tau_{min} + \tau_{max})$$

만일  $\tau_{new} > \tau$ 이면

$$\tau_{min} = \tau \quad \& \quad \tau = 0.5(\tau_{min} + \tau_{max})$$

[Step 5]

$\tau$ 가 수렴할 때까지, step 2 - step 4를 반복한다.

위 알고리즘의 아이디어는 다음과 같다. 만일 현재 단계의 전송 확률이 참값(실제의 전송 확률)보다 높게 잡혀 있다면, 각 사용자들이 전송상태에 돌입할 확률이 높아지므로 충돌 확률이 높아진다. 따라서 각 스테이션이 통상적으로 경험하게 되는 백오프 절차의 단계가 높아지게 된다. 이는 스테이션이 전송상태에 돌입할 확률을 낮추는 결과를 낳아서 다음 단계의 전송 확률은 참값보다 낮아진다. 따라서 알고리즘의 단계가 반복됨에 따라 전송 확률은 참값에 수렴하게 된다.

기본 DCF 하에서의 채널의 전송 처리율을 구해 보자.  $p_S$ 를 임의의 이산 구간동안 채널에서 성공전송이 일어날 확률이라고 하고,  $p_C$ 는 충돌전송이 일어날 확률이라고 하

자. 또한  $p_I$ 는 임의의 이산 구간 동안 채널이 유휴 상태에 있을 확률이라고 하면, 이 세 확률은 전송 확률과 스테이션의 수를 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$p_I = (1 - \tau)^N$$

$$p_S = N \times \tau \times (1 - \tau)^{N-1}$$

$$p_C = 1 - (1 - \tau)^N - N \times \tau \times (1 - \tau)^{N-1}$$

따라서 채널의 전송 처리율은

$$\frac{p_S \times T_S}{p_I \times \delta + p_S \times T_S + p_C \times T_C}$$

이 된다.

#### IV. 모형 검증과 시뮬레이션

알고리즘의 구현과 시뮬레이션은 SAS/IML 모듈을 이용하여 작성하였으며 수치 해석적 결과와 시뮬레이션 결과 비교를 위한 시스템 파라미터는 <표 4.1>과 같다.

표 4.1 시스템 파라미터  
Table 4.1 System Parameters

시스템 파라미터	기호	설정 값
스테이션의 수	$N$	5
최대 백오프 단계	$M$	7
DIFS를 구성하는 슬롯 수	$D$	3
성공 전송에 소요되는 슬롯 수	$t_S$	10
충돌 전송에 소요되는 슬롯 수	$t_C$	7
백오프 윈도우의 최소값	$W_{min}$	8
슬롯 당 패킷 도착 확률	$\lambda$	1/100
세션 당 평균 패킷 수	$\bar{P}$	70

(그림 4.1)은 시뮬레이션의 결과를 처음 500번에 대해서 보여 주고 있다. 충분한 회수로 시뮬레이션 한 후의 결과와 수치 해석적 결과는 <표 4.2>에서 보는 바와 같이 거의 완벽하게 일치함을 알 수 있다.

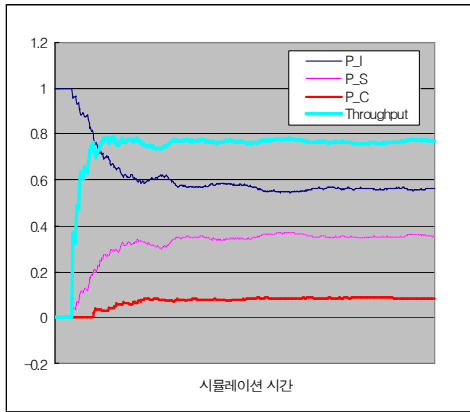


그림 4.1 시뮬레이션 결과  
Fig. 4.1 Simulation result

표 4.2 수치해석적 결과와 시뮬레이션결과 비교  
Table 4.2 Numerical Result vs Simulation

	Throughput	$P_I$	$P_S$	$P_C$
수치 해석적 결과	0.747225	0.561965	0.343277	0.094767
시뮬레이션 결과	0.751147	0.560143	0.346696	0.093260

패킷 손실을 가정하지 않는 [10]에서의 모형과 전송 처리 능력(throughput)을 비교하였다(그림 4.2). 스테이션의 수가 증가할수록 패킷 손실이 있는 시스템의 전송 처리 능력이 점점 더 저하됨을 확인할 수 있다.

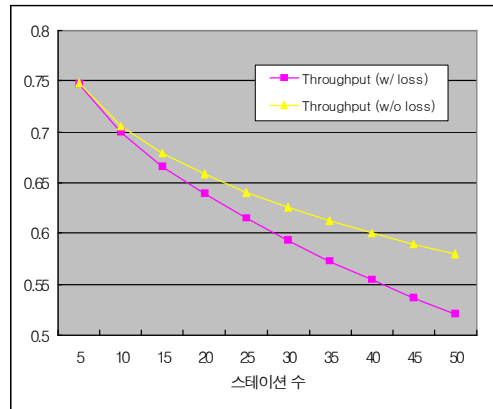


그림 4.2 패킷 손실이 있는 경우와 없는 경우의 전송 처리율 비교  
Fig. 4.2 Comparison of Throughput w/ and w/o Packet Loss

이러한 현상은 (그림 4.3)으로부터 설명될 수 있다. 성공 전송 확률은 스테이션의 수나 패킷 손실의 허용 여부와 상관없이 대체로 일정하다. 한편, 스테이션의 수가 증가될수록 충돌 전송 확률은 커지는 추세이며 유향 확률은 감소한다. 또한 패킷 손실을 허용하는 경우 충돌 전송 확률과 유향 확률의 격차는 스테이션의 수가 많아질수록 더욱 커진다.

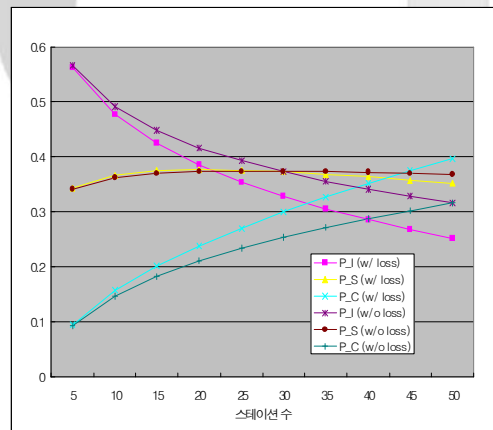


그림 4.3 패킷 손실이 있는 경우와 없는 경우의 확률 비교  
Fig. 4.3 Comparison of Probabilities w/ and w/o Packet Loss



## V. 결론 및 향후 연구과제

본 논문에서는 IEEE 802.11 프로토콜을 사용하는 무선 랜을 마코프 모형을 사용하여 분석하였다. 각 스테이션에 패킷이 기하분포에 따라 도착하고 최종 백오프 단계 이후에서의 패킷 손실을 가정하는 경우에 대하여, 임의의 시점에서의 전송확률을 구하는 알고리즘을 제시하고 그에 따른 채널 전송 처리율을 유도한 후, 시뮬레이션을 통하여 모형을 검증하였다. 또한 패킷 손실이 없는 경우와도 비교를 실시하였다.

시뮬레이션 결과 수치 해석적 접근 방법과 근사한 결과를 보였으며 스테이션 수가 증가함에 따라 패킷 손실도 비례하여 증가함을 알 수 있었다.

본 연구에서는 기본 전송 방식을 사용하는 경우만 분석하였으므로 향후 RTS/CTS 방식을 사용하는 경우에 대한 분석이 필요하다. 또한 서로 다른 우선 순위를 가지는 데이터에 대한 QoS 보장을 위해 클래스별로 다른 DIFS와 백오프 과정을 가지는 802.11e 프로토콜에 대한 연구도 수행되어야 한다.

## 참고문헌

[1] IEEE "IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification", Nov. 1997. P.802.11, 1997.  
 [2] IEEE "Wireless medium access control(MAC) and physical layer (PHY) specifications: Medium access control (MAC) enhancements for quality of service (QoS), IEEE std. 802.11e/Draft 6.0", 2003.  
 [3] Bianchi, G. "Performance Analysis of the 802.11 Distributed Coordination Function", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.18, pp.535-547, 2000  
 [4] Wu, H., Peng, Y., Long, K. and Ma, J. "Performance of Reliable Transport Protocol over

IEEE 802.11 Wireless LAN : Analysis and Enhancement", Proceedings of IEEE INFOCOM, vol.2, pp.599-607, 2002.  
 [5] Kong, Z., Tsang, D. H. K. and Bensaou, B. "Performance Analysis of IEEE 802.11e Contention-Based Channel Access", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.22, pp.2095-2106, 2004.  
 [6] Robinson, J. W. and Randhawa, T. S. "Saturation Throughput Analysis of IEEE 802.11e Enhanced Distributed Coordination Function", IEEE Journal of Selected Areas in Communications, vol.22, 917-928, 2004.  
 [7] Chatzimisios, P., Boucouvalas, A. C. and Vitsas, V. "Performance Analysis of IEEE 802.11 DCF in Presence of Transmission Errors", IEEE Communications Society, pp.3854-3858, 2004  
 [8] Zaki, A. N. and El-Hadidi, M. T. "Throughput Analysis of IEEE 802.11 DCF under Finite Load Traffic", 2004.  
 [9] Duffy, K., Malone, D. and Leith, D. J. "Modeling the 802.11 Distributed Coordination Function in Non-saturated Conditions", To appear IEEE communications Letter, 2005.  
 [10] Lee, G., Kang, Y.-G., and Choi, C.-W. "Analysis of IEEE 802.11 DCF under Finite Load Conditions", Journal of the Korean Data Analysis Society, 2005. (Submitted)  
 [11] Lee, G., Kang, Y.-G., and Choi, C.-W. "Equilibrium Point Analysis of the Performance of IEEE 802.11 DCF under Poisson Packet Arrivals", Journal of the Korean Data Analysis Society, 2005. (Submitted)

## 저자소개



### 최창원

1965년 8월 고려대학교 컴퓨터학과, 이학박사

1996~현재 한신대학교 정보시스템학과 부교수

<관심분야> 네트워크 성능평가, 네트워크 보안, 임베디드 시스템