

# IEEE 802.11기반 무선랜에서의 서비스 차별화와 성능 분석

## Service Differentiation in IEEE 802.11-based Wireless LAN and Throughput Analysis

이 계 민\*  
Gyemin Lee

강 영 경\*\*  
Yung-Gyung Kang

최 창 원\*\*\*  
Chang-Won Choi

### 요 약

CSMA/CA 프로토콜에 기반을 둔 DCF를 사용하여 공유 전송 매체 접근을 제어하는 IEEE 802.11 프로토콜은 현재 가장 많이 사용되고 있는 무선랜 표준이다. 이 논문에서는 802.11 기반 무선랜에서 서로 다른 특성을 가지는 두 가지 유형의 데이터에 대하여 백오프 윈도우 사이즈와 재전송 메커니즘을 달리하는 서비스 차별화를 제안하고 유한 트래픽 조건 아래서 스테이션의 상태에 대한 마코프 모형을 제시한 후, 전송 확률을 구하는 알고리즘과 채널 전송처리율을 유도한다. 또한 다양한 시스템 설정 하에서 시뮬레이션을 통한 모형 검증과 성능 평가를 실시한다.

### Abstract

The DCF of IEEE 802.11 standard coordinates transmissions onto the shared communication channel based on CSMA/CA protocol. Currently, 802.11 is the most widely deployed wireless LAN standard. In this paper, for 802.11-based wireless LAN we propose a service differentiation scheme adopting different contention window sizes and retransmission schemes for two different types of data packets and we present a Markov model for the state of a given station under a finite load traffic condition. We then derive an algorithm to find the transmission probability and the throughput. The proposed model is validated through simulation under various system settings.

☞ Keyword : IEEE 802.11 standard, CSMA/CA protocol, service differentiation, throughput

## 1. 서 론

무선 이더넷(Ethernet)이라 불리기도 하는 IEEE 802.11 표준은 무선 LAN의 물리적(PHY) 계층과 매체 접근 제어(MAC) 계층 규격을 제시하고 있으며 현재 가장 보편적으로 사용되고 있는 무선 LAN 표준이다[1]. 802.11 MAC 프로토콜은 DCF(distributed coordination function)라 불리는 방식을 이용하여 무선 공용 전송 매체(medium) 접근을 제

어하는데, DCF는 이진 지수 백오프(binary exponential backoff)를 사용하는 CSMA/CA (carrier sense multiple access with collision avoidance) 프로토콜 기반의 임의 접근 방식을 사용한다. CSMA/CA 방식은 패킷 전송을 원하는 스테이션으로 하여금 유휴 채널(idle channel)을 DIFS (distributed interframe space)라 불리는 일정 시간동안 먼저 관찰하게 한 후, 랜덤한 시간만큼 백오프한 후 전송을 시도하게 한다. 무선 환경에서는 전송된 패킷의 충돌여부를 알지 못하므로 ACK (acknowledgment) 컨트롤 프레임의 수신 여부로 충돌 여부를 추측한다.

IEEE 802.11 표준이 제안된 이래 이에 대한 많은 모형 제안과 성능 분석(performance analysis) 연구가 이루어 졌다. 그 중 특히 Bianchi는 백오프

\* 정 회 원 : 국립경상대학교 수학.정보통계학과 부교수  
gyemin@gsnu.ac.kr(제1저자)

\*\* 정 회 원 : 한신대학교 정보시스템공학과 부교수  
ykang@hs.ac.kr

\*\*\* 정 회 원 : 한신대학교 정보시스템공학과 부교수  
won@hs.ac.kr

[2005/06/27 투고 - 2005/08/10 심사 - 2005/09/30 심사완료]

단계와 백오프 카운터로 이루어진 이차원 마코프 모형을 이용하여 포화 상태에서의 DCF 전송처리율(saturation throughput)을 계산하였다[2]. 이 후 많은 연구에서 Bianchi의 모형이 확장되었다[3-6]. 하지만 포화 상태 조건 하에서는 각 스테이션의 전송 대기열(transmission queue)에 항상 전송할 패킷이 존재한다. 그러나 실제 상황에서는 스테이션의 대기열에 전송할 패킷이 없는 스테이션의 유휴 상태(idle station)도 발생한다. 이러한 유한 트래픽(finite traffic load) 가정 하에서의 DCF 모형화와 성능 분석은 좀 더 복잡해진다[7,8]. 최근에는 멀티미디어 데이터의 증가에 따라, 우선순위(priority)를 달리 하는 다양한 클래스의 트래픽에 대한 QoS를 보장하는 새로운 IEEE 802.11e 표준이 제안되었다[9]. 802.11e 표준에서는 전송 데이터의 클래스의 우선 순위에 따라 서로 다른 백오프 윈도우나 서로 다른 DIFS(흔히, AIFS라 부름)를 사용하는 서비스 차별화(service differentiation)를 통하여 QoS를 보장하고자 한다[4,5]. 특히, 음성이나 비디오와 같은 지연(delay)에 민감한 실시간(real-time : RT) 트래픽과 보통의 데이터(best-effort : BE) 트래픽, 두 클래스의 트래픽에 대한 차별화를 위한 우선 순위 전략(priority scheme) 연구의 중요성이 부각된다[10][11]. 일반적으로 DCF하에서는 ACK를 수신하지 못한 경우 백오프 단계를 올려가며 계속 재전송을 시도한다. 하지만 RT 트래픽의 경우, 프레임을 송신하는데 너무 긴 시간이 소요될 경우 프레임이 전송되었다고 하더라도 지나친 지연시간으로 인해 더 이상 쓸모가 없는 경우가 발생할 수도 있다. 따라서, 최종 백오프 단계에서도 전송에 실패한 데이터에 대하여 계속적인 재전송을 시도하는 기존의 DCF는 RT 트래픽에는 적절하지 않게 된다.

본 논문에서는 RT 데이터를 전송하고자 하는 스테이션과 BE 데이터를 전송하고자 하는 스테이션이 혼재하는 경우, 기본 DCF 방식을 적용하되 재전송 메커니즘과 백오프 윈도우를 클래스별로 달리 하여 두 클래스를 차별화하는 경우를 유한 트래픽 가정하에서 모형화하고 그에 따른 각 클래스별 채널 전송처리율과 전체 전송처리율을 구하는 성능 분석을 실시하고자 한다. 제안된 모형 역시 Bianchi

계열의 모형이라 할 수 있지만, 본 모형은 다음의 두 가지 관점에서 Bianchi의 모형과 뚜렷이 차별된다. 첫째, 포화 상태를 가정하지 않음으로 인해서 생기는 스테이션의 유휴 상태를 모형에서 고려하였으며, 둘째 세션(session) 개념을 도입하였다. 여기서 세션이란 스테이션의 비어있는 전송 패킷 대기열에 새로운 패킷이 도착하는 순간부터 다시 대기열이 비어 있게 될 때까지의 기간을 의미한다. 매 슬롯마다 시스템을 관측하는 것이 아니라[7], 시스템에 변화가 생기는 이산 시점에서만 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 논문의 모형에서는 다루고 있다. 패킷 손실을 허용하는 경우와 허용하지 않는 경우를 각각 다룬 [12,13]의 연구 결과를 기반으로, 본 논문에서는 두 유형이 혼재하는 경우 서비스 차별화를 통한 성능 평가를 다룬다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 먼저 2장에서는 기본 DCF 방식을 간략하게 정리하고, 3장에서는 클래스별 스테이션 모형을 제시하고, 전송처리율(throughput) 계산에 필요한 전송확률 계산을 위한 수치 해석적 알고리즘을 제시한다. 그리고 4장에서는 제안된 수치 해석적 방법의 타당성을 다양한 시스템 모수 하에서 시뮬레이션 결과와 비교하여 입증한다. 5장에서는 결론과 향후 연구과제를 제시하고자 한다. 6장에서는 3장에서 제안된 모형의 상태방정식(balance equations)을 부록으로 제시한다.

## 2. 기본 DCF 방식 요약

IEEE 802.11 MAC 프로토콜의 기본 전송 방식(basic transmission mechanism)은 다음과 같은 방식으로 스테이션의 매체 접근을 제어한다. 전송할 패킷이 도착하면 스테이션은 먼저 채널 상태를 모니터링하여, 만일 채널이 DIFS동안 유휴하면 바로 전송을 시작한다. 그러나, 패킷이 도착한 시점에서나 DIFS동안 기다리는 중에 채널상에 전송이 감지되면, 스테이션은 채널이 DIFS동안 유휴할 때까지

가다렸다가 채널이 유희한 동안 백오프 절차를 수행한 후 패킷을 전송한다.

백오프 기법은 공유 매체에 접근하고자 하는 여러 스테이션이 경쟁(contention)하는 경우 혼잡을 제어하는데 흔히 사용하는 기법으로 슬롯 타임 단위로 작동한다. 백오프를 실시하기 위해서는 먼저 백오프 윈도우(혹은 contention window)에서 임의의 값을 선택하여 채널이 유희한 동안 이 백오프 카운터 값을 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 배가 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  $28 \mu s$  vs  $128 \mu s$ )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 앞서 언급한 바와 같이 백오프의 단계를 올리게 된다. 일단 성공 전송이 일어난 스테이션은 백오프 윈도우를  $W_{\min}$ 로 재설정한다.

### 3. 모형 제안과 분석

현재 네트워크에는 총  $N$ 개의 스테이션이 DCF 방식을 이용하여 공유 전송 매체를 통하여 패킷을

전송하고자 한다고 하자. 그 중,  $N^{(1)}$  스테이션들은 유형 1 데이터(예를 들면 BE 데이터)를 전송하고자 하는 스테이션들로서 이 경우는 전송에 성공할 때까지 계속 재전송을 시도하여 패킷 손실(packet loss)을 허용하지 않으며, 나머지  $N^{(2)}$  스테이션들은 유형 2 데이터(예를 들면 RT 데이터)를 전송하는 스테이션들로서 이 경우는 마지막 백오프 후 전송 실패 시 패킷 손실이 발생한다고 가정하자. 즉, 유형 2 스테이션이 전송하고자 하는 패킷은 유형 1 스테이션의 패킷보다 우선순위가 높다고 할 수 있다. 각 스테이션의 상태는 채널 상태와 전송 대기열에 있는 패킷의 수에 따라 결정되며, 각 스테이션은 독립적으로 행동한다고 가정하자. 우리는 채널의 상태에 따라 시간을 다음 세 종류의 이산구간으로 구분하여 매 이산구간의 끝에 스테이션의 상태를 관측한다고 가정하자. 우선 시간을 길이가  $\delta$ 인 슬롯 단위로 나누어 채널을 통한 전송이 일어나지 않으면 하나의 슬롯이 하나의 이산구간을 형성한다. 채널을 통한 전송이 일어나고 있는 경우는 전송이 시작된 시점에서부터 그에 따른 부수적인 동작이 모두 처리될 때까지가 하나의 이산구간을 형성한다. 즉, 각 성공전송의 경우는 길이가  $T_s^{(i)} = (\text{유형 } i \text{의 패킷 전송 시간} + \text{SIFS} + \text{ACK} + \text{DIFS})$ (이후 모든  $i=1,2$ )인 구간이 하나의 이산 구간을 형성하며, 충돌전송의 경우는 길이가  $T_c^{(i)} = (\text{유형 } i \text{의 패킷 전송 시간} + \text{DIFS})$ 인 구간이 하나의 이산 구간이 된다. 이러한 이산 구간들을 모두 슬롯 단위로 환산하기 위하여, 유형  $i$  스테이션의 경우, 순수하게 패킷 전송에만 소요되는 시간이  $t_c^{(i)}$  슬롯이라고 하고,  $t_s^{(i)}$ 는 (유형  $i$ 의 패킷 전송 시간 + SIFS + ACK)의 슬롯수, 그리고 하나의 DIFS는  $D$ 개의 슬롯으로 이루어져 있다고 가정하자. 즉, 성공전송의 경우, 우리는  $(t_c^{(i)} + D)$  슬롯이 경과한 후 시스템을 관찰하며, 충돌전송의 경우는  $(t_c^{(i)} + D)$  슬롯 후 관찰한다. 각 유형별로  $m$ 번째 백오프를 구성하는 슬롯의 수를  $W_m^{(i)}$ 이라 하면,  $W_m^{(i)} = 2^{m-1}W_{\min}^{(i)}$ 이 되며, 유형별 최대 백오프 단계는  $M^{(i)}$ 로 표시하자.

임의의 시점에서 유형 1 스테이션과 유형 2 스

테이션은 아래와 같이 세 종류로 분류될 수 있는 상태들 중 하나에 속한다.

(S1)  $I$  : 전송할 패킷이 없는 상태

(S2)  $(S, l)$  : 하나의 세션이 시작된 후 첫 번째 패킷이  $l$  슬롯을 경험하면 첫 번째 DIFS가 완료되는 상태,

단,  $l=0, 1, \dots, (D-1)$

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

단,  $n=1, 2, 3, \dots, l=0, \dots, (W_m^{(i)}-1), m=1, \dots, M^{(i)}$

전송 패킷에 대한 포화상태를 가정하지 않았으므로 각 스테이션은 때로는 전송해야 할 패킷이 없는 상태에 있을 수 있는데, 이 상태가 스테이션의 유향상태, 즉 상태  $I$  (S1)이다. 앞서 정의한 바와 같이, 어떤 스테이션의 비어있는 전송 패킷 대기열에 새로운 패킷이 도착하는 순간부터 다시 대기열이 비어 있게 될 때까지의 시간을 세션이라 하고, 유형  $i$  스테이션이 한 세션동안 전송할 패킷이  $n$ 개 일 확률을  $f_n^{(i)}$ 이라 하자. 이 때, 한 세션동안 전송되는 평균 패킷수를  $\overline{P}^{(i)}$ 라 정의하면,  $\overline{P}^{(i)}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\overline{P}^{(i)} = \sum_{n=1}^{\infty} n f_n^{(i)}, \text{ 단, } f_n^{(i)} = \sum_{j=n}^{\infty} f_j^{(i)}$$

또한 유형  $i$  스테이션이 유향상태를 탈출하는데 필요한 슬롯의 수는 성공 확률이  $\lambda^{(i)}$ 인 기하분포를 따른다고 가정하자.

우리는 시스템을 위에서 정의한 세 종류의 이산 시점에서만 관측하므로, 새로운 세션의 첫 번째 패킷이 도착한 후 우리가 시스템을 관찰할 때는 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  $(S, l)$ 은 세션의 첫 번째 패킷이 이미  $(D-l)$  슬롯을 경험하여 DIFS의 완료를 위해서는 나머지  $l$  슬롯만 경

험하면 되는 상태를 일컫는다. 한편, 패킷이 도착한 후 채널에서의 전송을 관찰한 스테이션은 채널이 유향해 질 때까지 기다렸다가 유향 채널을 DIFS동안 관찰한 후, 채널에 아무런 전송이 없는 동안은 백오프 절차를 수행하여 매 슬롯의 끝에 백오프 카운터  $l$ 을 1씩 감소시켜 백오프 카운터가 영이 되면 스테이션은 전송을 시도한다. 성공전송의 경우, 패킷의 수  $n$ 은 1 감소하고 백오프 단계는 1로 재설정되며, 충돌전송의 경우는 백오프 단계를 1 증가시킨다.

이제  $x_I^{(i)}, x_{S,l}^{(i)}, x_{n,m,l}^{(i)}$  을 유형  $i$ 인 임의의 스테이션이 평형상태에서 각각  $I, (S, l), (n, m, l)$  상태에 있을 확률이라고 하자.  $\tau^{(i)}$ 를 임의의 이산 구간동안 유형  $i$  스테이션이 패킷을 전송할 극한 확률로 정의하고 유형  $i$  패킷의 전송확률이라 부르며, 전송은 백오프 카운터가 제로가 될 때 일어나므로 전송확률은

$$\tau^{(i)} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{M^{(i)}} x_{n,m}^{(i)}, 0$$

으로 표현된다. 이제 임의의 유형  $i$  스테이션에 대하여 이 스테이션을 제외한 나머지  $(N^{(i)}-1)$  스테이션들과 다른 유형인  $N^{(j)}$  스테이션들(단,  $j=1, 2, j \neq i$ ) 중에서 정확히  $k$  개의 스테이션(들)만 전송을 시작할 확률을  $p_k^{(i)}$ 라 하고,  $\overline{p}_k^{(i)}$ 는  $k$ 개 이상의 스테이션(들)이 전송을 시작할 확률이라 정의하면, 이러한 확률들은 전송확률  $\tau^{(i)}$ 를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$p_0^{(i)} = (1 - \tau^{(i)})^{N^{(i)}-1} (1 - \tau^{(j)})^{N^{(j)}} \quad (3.1)$$

$$p_1^{(i)} = (N^{(i)}-1) \tau^{(i)} (1 - \tau^{(i)})^{N^{(i)}-2} (1 - \tau^{(j)})^{N^{(j)}} + N^{(j)} \tau^{(j)} (1 - \tau^{(j)})^{N^{(j)}-1} (1 - \tau^{(i)})^{N^{(i)}-1} \quad (3.2)$$

$$\overline{p}_1^{(i)} = 1 - p_0^{(i)} \quad (3.3)$$

$$\overline{p}_2^{(i)} = 1 - p_0^{(i)} - p_1^{(i)} \quad (3.4)$$

모형에 대한 유형별 상태 방정식은 다소 길고 복잡하여 6장에 부록으로 제시하였다.

이제 전송 확률  $\tau^{(i)}$ 에 대한 임의의 초기값에서 시작하여, 그 값이 수렴할 때까지 매 단계마다 전송 확률을 업데이트시키는 알고리즘의 아이디어는 다음과 같다. 만일 현재 단계의 전송 확률이 참값보다 높게 잡혀 있다면, 각 사용자들이 전송상태에 돌입할 확률이 높아지므로 충돌확률이 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.

#### <Algorithm>

step 1 : 다음과 같이 초기화한다.

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

$i = 1, 2$

step 2 : 다음과 같이  $\tau_{new}^{(i)}$  를 계산한다.

현재의  $\tau^{(i)}$ 를 이용하여  $p_k^{(i)}$ 와  $\overline{p_k^{(i)}}$ 를 계산한다.

(식 (3.1)-(3.4))

$$x_{1,1,0}^{(i)} = \frac{1 - p_0^{(i)}(1 - \lambda^{(i)}) - p_1^{(i)}(1 - \lambda^{(i)})^{c_s^{(i)} + D} - \overline{p_2^{(i)}}(1 - \lambda^{(i)})^{c_c^{(i)} + D}}{(1 - \lambda^{(i)})^D}$$

$$x_{S,l}^{(i)} = \lambda^{(i)} [x_{1,1,0}^{(i)} + p_1^{(i)}(1 - \lambda^{(i)})^{c_s^{(i)}} + \overline{p_2^{(i)}}(1 - \lambda^{(i)})^{c_c^{(i)}}]$$

$$\times \frac{1 - [(1 - \lambda^{(i)}) p_0^{(i)}]^{D-l}}{1 - (1 - \lambda^{(i)}) p_0^{(i)}} (1 - \lambda^{(i)})^l + \lambda^{(i)} (p_0^{(i)})^{D-l}$$

$$c_0^{(i)} = x_{S,0}^{(i)} p_0^{(i)} + \sum_{l=0}^{D-1} x_{S,l}^{(i)} \overline{p_1^{(i)}}$$

$$+ \left[ \overline{p_1^{(i)}} - p_1^{(i)}(1 - \lambda^{(i)})^{c_s^{(i)}} - \overline{p_2^{(i)}}(1 - \lambda^{(i)})^{c_c^{(i)}} \right]$$

1)  $\tau_{new}^{(1)}$  를 계산한다.

$$\alpha^{(1)} = 1 + \left( \sum_{l=0}^{D-1} x_{S,l}^{(1)} \right) + \left( c_0^{(1)} \overline{P^{(1)}} \right) \left( \sum_{m=1}^M \frac{(\overline{p_1^{(1)}})^{m-1}}{(1 - \overline{p_1^{(1)}})^{m-1}} \frac{W_m^{(1)} + 1}{2} \right)$$

$$\tau_{new}^{(1)} = \frac{c_0^{(1)} \overline{P^{(1)}}}{\alpha^{(1)}} \frac{1}{1 - \overline{p_1^{(1)}}}$$

2)  $\tau_{new}^{(2)}$  를 계산한다.

$$\alpha^{(2)} = 1 + \left( \sum_{l=0}^{D-1} x_{S,l}^{(2)} \right) + \left( c_0^{(2)} \overline{P^{(2)}} \right) \left( \sum_{m=1}^M \frac{(\overline{p_1^{(2)}})^{m-1}}{(1 - \overline{p_1^{(2)}})^{m-1}} \frac{W_m^{(2)} + 1}{2} \right)$$

$$\tau_{new}^{(2)} = \frac{c_0^{(2)} \overline{P^{(2)}}}{\alpha^{(2)}} \frac{1 - (\overline{p_1^{(2)}})^{D^2}}{1 - \overline{p_1^{(2)}}}$$

step 3 : 다음과 같이  $\tau^{(i)}$ 를 업데이트한다.

$$\text{만일 } |\tau_{new}^{(1)} - \tau^{(1)}| > |\tau_{new}^{(2)} - \tau^{(2)}| \quad \& \quad \tau_{new}^{(1)} < \tau^{(1)}$$

$$\Rightarrow \tau_{\max}^{(1)} = \tau^{(1)}$$

$$\text{만일 } |\tau_{new}^{(1)} - \tau^{(1)}| > |\tau_{new}^{(2)} - \tau^{(2)}| \quad \& \quad \tau_{new}^{(1)} > \tau^{(1)}$$

$$\Rightarrow \tau_{\min}^{(1)} = \tau^{(1)}$$

$$\text{만일 } |\tau_{new}^{(1)} - \tau^{(1)}| < |\tau_{new}^{(2)} - \tau^{(2)}| \quad \& \quad \tau_{new}^{(2)} < \tau^{(2)}$$

$$\Rightarrow \tau_{\max}^{(2)} = \tau^{(2)}$$

$$\text{만일 } |\tau_{new}^{(1)} - \tau^{(1)}| < |\tau_{new}^{(2)} - \tau^{(2)}| \quad \& \quad \tau_{new}^{(2)} > \tau^{(2)}$$

$$\Rightarrow \tau_{\min}^{(2)} = \tau^{(2)}$$

업데이트된  $\tau_{\min}^{(i)}$ 과  $\tau_{\max}^{(i)}$ 를 이용하여  $\tau^{(i)} = 0.5$  ( $\tau_{\min}^{(i)} + \tau_{\max}^{(i)}$ )를 재계산한다.

step 4 :  $\tau^{(1)}$ 과  $\tau^{(2)}$ 가 수렴할 때까지, step 2-3을 반복한다.

이제 마지막으로 유형별 그리고 시스템의 채널 전송처리율을 구해 보자. 시스템의 전송처리율은 단위 슬롯 시간당 전송 가능한 정보량(payload information), 즉 채널이 성공 전송에 소요되는 시간의 비율을 의미한다[2]. 본 모형에서의 전송처리율 계산은 일단 각 유형별 전송 확률이 계산되고 나면 아주 간단하다.  $p_S^{(i)}$ 를 임의의 이산구간동안 채널에서 유형  $i$  스테이션이 성공적으로 전송할 확률이라고 하고,  $p_C^{(i)}$ 는 유형  $i$  스테이션끼리 충돌 전송할 확률이라고 하자. 한편,  $p_C^{(3)}$ 은 서로 다른 유형의 스테이션이 충돌 전송을 발생시킬 확률이라고 하자. 또한  $p_I$ 는 임의의 이산 구간 동안 채널이 유히 상태에 있을 확률이라고 하자. 이 확률들은 유형별 전송확률과 스테이션의 수를 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$p_I = (1 - \tau^{(1)})^{N^{(1)}} \times (1 - \tau^{(2)})^{N^{(2)}}$$

$$p_S^{(1)} = N^{(1)} \times \tau^{(1)} \times (1 - \tau^{(1)})^{N^{(1)}-1} \times (1 - \tau^{(2)})^{N^{(2)}}$$

$$p_S^{(2)} = N^{(2)} \times \tau^{(2)} \times (1 - \tau^{(2)})^{N^{(2)}-1} \times (1 - \tau^{(1)})^{N^{(1)}}$$

$$p_C^{(1)} = (1 - (1 - \tau^{(1)})^{N^{(1)}} - N^{(1)} \times \tau^{(1)} \times (1 - \tau^{(1)})^{N^{(1)}-1}) \times (1 - \tau^{(2)})^{N^{(2)}}$$

$$p_C^{(2)} = (1 - (1 - \tau^{(2)})^{N^{(2)}} - N^{(2)} \times \tau^{(2)} \times (1 - \tau^{(2)})^{N^{(2)}-1}) \times (1 - \tau^{(1)})^{N^{(1)}}$$

$$p_C^{(3)} = (1 - (1 - \tau^{(1)})^{N^{(1)}}) \times (1 - (1 - \tau^{(2)})^{N^{(2)}})$$

따라서, 유형 1 스테이션의 전송처리율은

$$\frac{p_S^{(1)} \times T_S^{(1)}}{p_I \times \delta + p_S^{(1)} \times T_S^{(1)} + p_S^{(2)} \times T_S^{(2)} + p_C^{(1)} \times T_C^{(1)} + p_C^{(2)} \times T_C^{(2)} + p_C^{(3)} \times T_C^{(3)}}$$

이 되고, 유형 2 스테이션의 전송처리율은

$$\frac{p_S^{(2)} \times T_S^{(2)}}{p_I \times \delta + p_S^{(1)} \times T_S^{(1)} + p_S^{(2)} \times T_S^{(2)} + p_C^{(1)} \times T_C^{(1)} + p_C^{(2)} \times T_C^{(2)} + p_C^{(3)} \times T_C^{(3)}}$$

이 되며, 마지막으로 채널의 전체 전송처리율은

$$\frac{p_S^{(1)} \times T_S^{(1)} + p_S^{(2)} \times T_S^{(2)}}{p_I \times \delta + p_S^{(1)} \times T_S^{(1)} + p_S^{(2)} \times T_S^{(2)} + p_C^{(1)} \times T_C^{(1)} + p_C^{(2)} \times T_C^{(2)} + p_C^{(3)} \times T_C^{(3)}}$$

으로 주어진다. 단, 식에서  $T_c^{(3)}$  = (유형 1 패킷 전송시간과 유형 2 패킷 전송시간 중 최대 + DIFS) 이다.

### 4. 모형 검증과 시뮬레이션

수치 해석적 알고리즘의 구현과 시뮬레이션을 위하여 SAS/IML 모듈을 이용하여 코드를 작성하였다. 모형 검증을 위하여 두 유형 모두, 순수하게

패킷 전송에 소요되는 슬롯의 수는 172개이며, SIFS와 ACK 전송에 소요되는 슬롯의 수는 5개, 그리고 DIFS는 3개의 슬롯으로 가정하였다.

먼저 유형별 스테이션의 비율과 전체 스테이션의 수를 변화시켜 가면서 전송처리율을 비교하였다. 유형 1(낮은 우선순위)의 최소 백오프 윈도우를 32, 유형 2(높은 우선순위)의 최소 백오프 윈도우를 16으로 하고, 두 유형 모두 최대 백오프 단계는 4, 그리고 스테이션이 한 슬롯동안 유희상태 탈출 확률을 1/100, 세션당 평균 패킷 수는 70으로 설정하였다. 그림 1은 유형 1 스테이션과 유형 2 스테이션의 비율이 1:1, 1:2, 1:5, 2:1, 5:1인 경우에 대하여 전체 스테이션의 수에 대한 전송처리율을 수치해석적 알고리즘에 의한 결과는 선으로, 시뮬레이션을 통한 결과는 점으로 표시하였다.

전체 스테이션 수가 증가함에 따라 전송처리율은 점점 낮아지며, 유형별 스테이션의 비율이 동일한 경우와 비교하여 유형 2 스테이션의 비율이 높아질수록 전송처리율은 악화되는 현상을 관찰할 수 있다. 그리고 모든 경우에 있어서 시뮬레이션의 결과는 알고리즘의 결과와 거의 완벽하게 일치함을 알 수 있다.

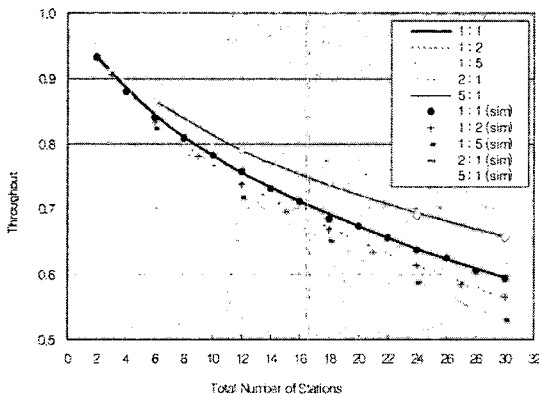


그림 1. Throughput vs Total Number of Stations

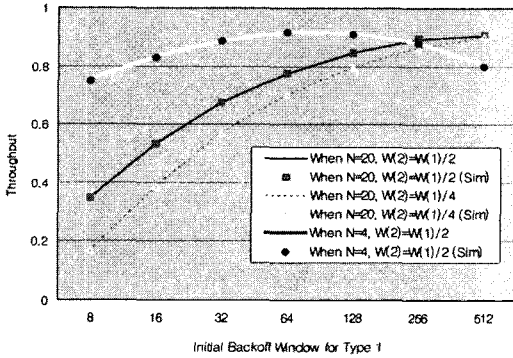


그림 2. Throughput vs Initial Backoff Window

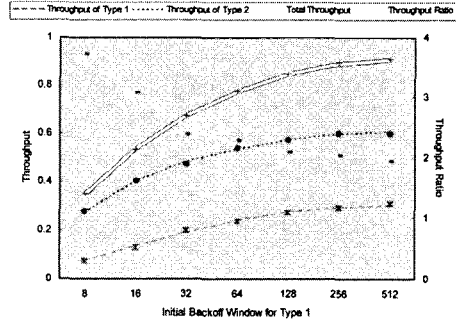


그림 3. Throughput vs Initial Backoff Window when  $N=20$  and  $W(2)=W(1)/2$

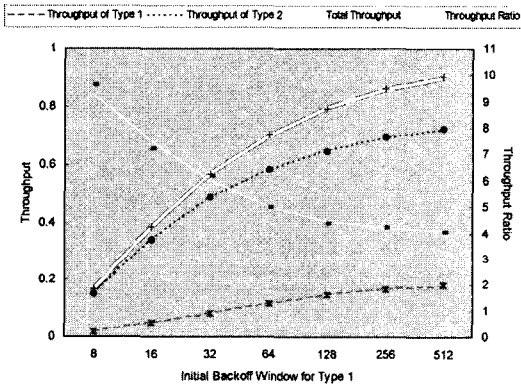


그림 4 Throughput vs Initial Backoff Window when  $N=20$  and  $W(2)=W(1)/4$

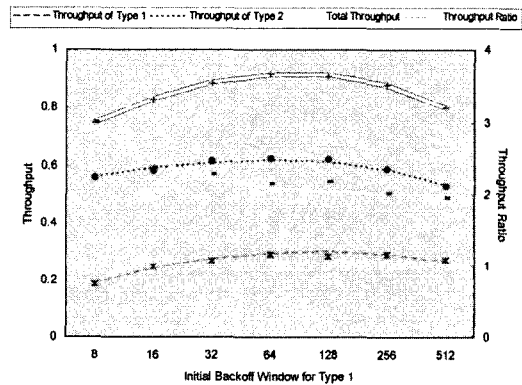


그림 5 Throughput vs Initial Backoff Window when  $n=4$  and  $W(2)=W(1)/2$

다음은 유형별 스테이션의 비율이 동일한 경우에 대하여 전체 스테이션의 수가 4, 20인 경우, 최소 백오프 윈도우의 크기를 변화시켜가며 전송처리를 비교하였다. 유형 2 스테이션의 최소 백오프 윈도우는 유형 1의 절반인 경우와 1/4인 경우를 실험하였다.

스테이션의 수가 적은 경우는 최소 백오프 윈도우가 증가함에 따라 전송처리율이 증가하다가 감소하는 추세를 보이며, 스테이션의 수가 많은 경우는 전송처리율이 증가하는 추세를 보이다가 추세가 둔화됨을 확인할 수 있다. 시뮬레이션의 결과는 점으로 표시하였는데 역시 그림 1에서와 마찬가지로 알고리즘의 결과와 거의 완벽하게 일치함을 확인할 수 있다.

그림 3, 그림 4, 그림 5는 그림 2의 각 경우에 대하여 각 유형별 전송처리율과 채널 전체 전송처

리를, 그리고 두 유형의 전송처리율 비(ratio)를 보여 주고 있다. 유형별 전송처리율과 전체 채널 전송처리율은 왼쪽 x축을, 전송처리율 비는 오른쪽 x축을 참조하면 된다. 세 경우 모두 유형 2의 전송처리율은 유형 1의 전송처리율보다 훨씬 낮다. 유형 2의 최소 백오프 윈도우가 유형 1의 절반인 경우에는 전송처리율의 비가 대략 2에서 4정도이다. 그러나, 유형 2의 최소 백오프 윈도우가 유형 1의 1/4인 경우인 그림 4를 살펴보면 두 유형별 전송처리율에 심각한 차이가 존재함을 알 수 있다. 시뮬레이션의 결과는 대체로 수치해석적 알고리즘의 결과와 일치하지만 유형별 전송처리율은 전체 채널 전송처리율의 정확도보다는 약간 떨어짐을 확인할 수 있다.

마지막으로, 탈출확률이 1/10000인 경우, 즉 스테이션이 유희상태를 빠져나가는 데 평균 10000 슬

롯 정도가 걸리는 경우, 세션당 평균 패킷 수를 변화시켜 가며 전송처리율을 비교하였다. 전체 스테이션의 수를 4, 10, 20으로 하였을 때, 세 경우 모두 세션당 패킷 수가 커짐에 따라 최대 전송처리율에 도달한 후 전송처리율이 포화 전송처리율에 수렴함을 알 수 있다. 특히 스테이션의 수가 작을수록 최대 전송처리율과 포화 전송처리율에는 큰 차이가 남을 알 수 있다.

## 5. 결론 및 향후 연구과제

본 논문에서는 IEEE 802.11 프로토콜 기반 무선랜에서 데이터 유형별로 서비스를 차별화하는 메카니즘을 제안하고 유한 트래픽 조건하에서 모형화하여 성능 분석을 실시하고 시뮬레이션을 통하여 모형을 검증하였다. 이러한 연구는 최근에 제안된 IEEE 802.11e 표준에 대한 선행 연구로서의 의미를 가진다고 할 수 있다.

하지만 본 논문에서 제안된 모형은 유형별 스테이션의 개수가 고정되어 있다고 가정하였지만 실제로는 유형별 스테이션의 수가 랜덤하므로, 즉 동일한 스테이션에서 서로 다른 유형의 패킷을 전송하는 것이 가능하므로 이러한 경우에 대한 모형 설정과 성능분석이 이루어져야 한다고 생각한다. 또한 유형별로 패킷의 길이를 달리하는 경우의 성능 평가 결과와도 비교해 보면 의미가 있을 수 있겠다. 실제로 DCF는 ACK 송수신만을 제공하는 기본 접근뿐만 아니라 전송 전 먼저 RTS/CTS (request-to-send / clear-to-send) 컨트롤 프레임 교환함으로써 가상적으로 채널을 예약하는 접근방식도 선택적으로 사용할 수 있게 하고 있다. 따라서 RTS/CTS를 접근 방식으로 채택하는 경우에 대한 연구도 이루어져야겠다.

## 참고 문헌

[1] IEEE "IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification", Nov. 1997. P.802.11, 1997.

[2] Bianchi, G. "Performance Analysis of the 802.11 Distributed Coordination Function", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.18, pp.535-547, 2000

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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

[7] Zaki, A. N. and El-Hadidi, M. T. "Throughput Analysis of IEEE 802.11 DCF under Finite Load Traffic", In First International Symposium on Control, Communications and Signal Processing, pp.535-538, 2004.

[8] 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.

[9] 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.

[10] Yang, X. and Pan, Y. "Differentiation, QoS Guarantee, and Optimization for Real-Time



Traffic over One-Hop Ad Hoc Networks”, IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Vol. 16, No. 6, 2005.

- [11] Ahn, G.-S., Campbell, A. T., Veres, A. and Sun, L.-H., “Supporting service differentiation for real-time and best-effort traffic in stateless wireless ad hoc networks (SWAN)”, IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 1, no. 3, pp. 192-207, 2002.

- [12] 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, Vol. 7, No. 4, pp. 1163-1174, 2005.

- [13] 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, Vol. 7, No. 5, pp. 1559-1570, 2005.

## 6. 부 록

(A) 유형 1 스테이션에 대한 상태 방정식 .

$$\begin{aligned}
 1) \ x_I^{(1)} &= \sum_{m=1}^{M^{(1)}} x_{1,m,0}^{(1)} \times p_0^{(1)} \times (1-\lambda^{(1)})^D \\
 &+ x_I^{(1)} \times p_0^{(1)} \times (1-\lambda^{(1)}) \\
 &+ x_I^{(1)} \times p_1^{(1)} \times (1-\lambda^{(1)})^{t_c^{(1)}+D} \\
 &+ x_I^{(1)} \times \overline{p_2^{(1)}} \times (1-\lambda^{(1)})^{t_c^{(1)}+D}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 2) \ x_{S,D-1}^{(1)} &= \sum_{m=1}^{M^{(1)}} x_{1,m,0}^{(1)} \times p_0 \times (1-\lambda^{(1)})^{D-1} \times \lambda^{(1)} \\
 &+ x_I^{(1)} \times p_0^{(1)} \times \lambda^{(1)} \\
 &+ x_I^{(1)} \times p_1^{(1)} \times (1-\lambda^{(1)})^{t_c^{(1)}+D-1} \times \lambda^{(1)} \\
 &+ x_I^{(1)} \times \overline{p_2^{(1)}} \times (1-\lambda^{(1)})^{t_c^{(1)}+D-1} \times \lambda^{(1)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 x_{S,l}^{(1)} &= \sum_{m=1}^M x_{1,m,0}^{(1)} \times p_0^{(1)} \times (1-\lambda^{(1)})^l \times \lambda^{(1)} \\
 &+ x_{S,l+1}^{(1)} \times p_0^{(1)} \\
 &+ x_I^{(1)} \times p_1^{(1)} \times (1-\lambda^{(1)})^{t_c^{(1)}+l} \times \lambda^{(1)} \\
 &+ x_I^{(1)} \times \overline{p_2^{(1)}} \times (1-\lambda^{(1)})^{t_c^{(1)}+l} \times \lambda^{(1)} \text{ for } l=0, 1, \dots, D-2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 3) \ x_{n,M^{(1)},W_{n^{(1)}-1}}^{(1)} &= x_{n,M^{(1)}-1,0}^{(1)} \times \overline{p_1^{(1)}} \times \frac{1}{W_{M^{(1)}}^{(1)}} \\
 &+ x_{n,M^{(1)},0}^{(1)} \times \overline{p_1^{(1)}} \times \frac{1}{W_{M^{(1)}}^{(1)}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 x_{n, M^{(1)}, W_{M^{(1)}-2}}^{(1)} &= x_{n, M^{(1)}-1, 0}^{(1)} \times \overline{p_1^{(1)}} \times \frac{1}{W_{M^{(1)}}^{(1)}} \\
 &+ x_{n, M^{(1)}, 0}^{(1)} \times \overline{p_1^{(1)}} \times \frac{1}{W_{M^{(1)}}^{(1)}} \\
 &+ x_{n, M^{(1)}, W_{M^{(1)}-1}}^{(1)} \\
 &\dots \\
 x_{n, M^{(1)}, 0}^{(1)} &= x_{n, M^{(1)}-1, 0}^{(1)} \times \overline{p_1^{(1)}} \times \frac{1}{W_{M^{(1)}}^{(1)}} \\
 &+ x_{n, M^{(1)}, 0}^{(1)} \times \overline{p_1^{(1)}} \times \frac{1}{W_{M^{(1)}}^{(1)}} + x_{n, M^{(1)}, 1}^{(1)} \\
 4) x_{n, M^{(1)}-1, W_{M^{(1)}-1-1}}^{(1)} &= x_{n, M^{(1)}-2, 0}^{(1)} \times \overline{p_1^{(1)}} \times \frac{1}{W_{M^{(1)}-1}^{(1)}} \\
 x_{n, M^{(1)}-1, W_{M^{(1)}-1-2}}^{(1)} &= x_{n, M^{(1)}-2, 0}^{(2)} \times \overline{p_1^{(1)}} \times \frac{1}{W_{M^{(1)}-1}^{(1)}} + x_{n, M^{(1)}, W_{M^{(1)}-1-1}}^{(1)} \\
 &\dots \\
 x_{n, M^{(1)}-1, 0}^{(1)} &= x_{n, M^{(1)}-2, 0}^{(1)} \times \overline{p_1^{(1)}} \times \frac{1}{W_{M^{(1)}-1}^{(1)}} + x_{n, M^{(1)}-1, 1}^{(1)} \\
 5) \dots \\
 6) x_{n, 2, W_2^{(1)}-1}^{(1)} &= x_{n, 1, 0}^{(1)} \times \overline{p_1^{(1)}} \times \frac{1}{W_2^{(1)}} \\
 x_{n, 2, W_2^{(1)}-2}^{(1)} &= x_{n, 1, 0}^{(1)} \times \overline{p_1^{(1)}} \times \frac{1}{W_2^{(1)}} + x_{n, 2, W_2^{(1)}-1}^{(1)} \\
 &\dots \\
 x_{n, 2, 0}^{(1)} &= x_{n, 1, 0}^{(1)} \times \overline{p_1^{(1)}} \times \frac{1}{W_2^{(1)}} + x_{n, 2, 1}^{(1)} \\
 7) x_{n, 1, W_1^{(1)}-1}^{(1)} &= \sum_{m=1}^M x_{n+1, m, 0}^{(1)} \times p_0^{(1)} \times \frac{1}{W_1^{(1)}} \\
 &+ x_{S, 0}^{(1)} \times p_0^{(1)} \times f_n^{(1)} \times \frac{1}{W_1^{(1)}} \\
 &+ \sum_{l=0}^{D-1} x_{S, l}^{(1)} \times \overline{p_1^{(1)}} \times f_n^{(1)} \times \frac{1}{W_1^{(1)}} \\
 &+ x_f^{(1)} \times p_1^{(1)} \times \sum_{k=1}^{k_c^{(1)}} (1-\lambda^{(1)})^{k-1} \times \lambda^{(1)} \times f_n^{(1)} \times \frac{1}{W_1^{(1)}} \\
 &+ x_f^{(1)} \times \overline{p_2^{(1)}} \times \sum_{k=1}^{k_c^{(1)}} (1-\lambda^{(1)})^{k-1} \times \lambda^{(1)} \times f_n^{(1)} \times \frac{1}{W_1^{(1)}} \\
 x_{n, 1, W_1^{(1)}-2}^{(1)} &= \sum_{m=1}^M x_{n+1, m, 0}^{(1)} \times p_0^{(1)} \times \frac{1}{W_1^{(1)}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + x_{S,0}^{(1)} \times p_0^{(1)} \times f_n^{(1)} \times \frac{1}{W_1^{(1)}} \\
& + \sum_{l=0}^{D-1} x_{S,l}^{(1)} \times \overline{p_1^{(1)}} \times f_n^{(1)} \times \frac{1}{W_1^{(1)}} \\
& + x_I^{(1)} \times p_1^{(1)} \times \sum_{k=1}^{t_n^{(1)}} (1-\lambda^{(1)})^{k-1} \times \lambda^{(1)} \times f_n^{(1)} \times \frac{1}{W_1^{(1)}} \\
& + x_I^{(1)} \times \overline{p_2^{(1)}} \times \sum_{k=1}^{t_n^{(1)}} (1-\lambda^{(1)})^{k-1} \times \lambda^{(1)} \times f_n^{(1)} \times \frac{1}{W_1^{(1)}} \\
& + x_{n,1,W_1^{(1)}-1}^{(1)} \\
& \dots \\
& x_{n,1,0}^{(1)} = \sum_{m=1}^M x_{n+1,m,0}^{(1)} \times p_0^{(1)} \times \frac{1}{W_1^{(1)}} \\
& + x_{S,0}^{(1)} \times p_0^{(1)} \times f_n^{(1)} \times \frac{1}{W_1^{(1)}} \\
& + \sum_{l=0}^{D-1} x_{S,l}^{(1)} \times \overline{p_1^{(1)}} \times f_n^{(1)} \times \frac{1}{W_1^{(1)}} \\
& + x_I^{(1)} \times p_1^{(1)} \times \sum_{k=1}^{t_n^{(1)}} (1-\lambda^{(1)})^{k-1} \times \lambda^{(1)} \times f_n^{(1)} \times \frac{1}{W_1^{(1)}} \\
& + x_I^{(1)} \times \overline{p_2^{(1)}} \times \sum_{k=1}^{t_n^{(1)}} (1-\lambda^{(1)})^k \times \lambda^{(1)} \times f_n^{(1)} \times \frac{1}{W_1^{(1)}} \\
& + x_{n,1,1}^{(1)}
\end{aligned}$$

(B) 유형 2 스테이션에 대한 상태 방정식

$$\begin{aligned}
1) \ x_I^{(2)} &= \sum_{m=1}^{M^{(2)}} x_{1,m,0}^{(2)} \times p_0^{(2)} \times (1-\lambda^{(2)})^D \\
& + x_{1,M^{(2)},0}^{(2)} \times \overline{p_1^{(2)}} \times (1-\lambda^{(2)})^D \\
& + x_I^{(2)} \times p_0^{(2)} \times (1-\lambda^{(2)}) \\
& + x_I^{(2)} \times p_1^{(2)} \times (1-\lambda^{(2)})^{t_n^{(2)}+D} \\
& + x_I^{(2)} \times \overline{p_2^{(2)}} \times (1-\lambda^{(2)})^{t_n^{(2)}+D} \\
2) \ x_{S,D-1}^{(2)} &= \sum_{m=1}^{M^{(2)}} x_{1,m,0}^{(2)} \times p_0^{(2)} \times (1-\lambda^{(2)})^{D-1} \times \lambda^{(2)} \\
& + x_{1,M^{(2)},0}^{(2)} \times \overline{p_1^{(2)}} \times (1-\lambda^{(2)})^{D-1} \times \lambda^{(2)} \\
& + x_I^{(2)} \times p_0^{(2)} \times \lambda^{(2)} \\
& + x_I^{(2)} \times p_1^{(2)} \times (1-\lambda^{(2)})^{t_n^{(2)}+D-1} \times \lambda^{(2)}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + x_I^{(2)} \times \overline{p_2^{(2)}} \times (1 - \lambda^{(2)})^{t_c^{(2)} + D - 1} \times \lambda^{(2)} \\
 x_{S,l}^{(2)} & = \sum_{m=1}^M x_{1,m,0}^{(2)} \times p_0^{(2)} \times (1 - \lambda^{(2)})^l \times \lambda^{(2)} \\
 & + x_{1,M^{(2)},0}^{(2)} \times \overline{p_1^{(2)}} \times (1 - \lambda^{(2)})^l \times \lambda^{(2)} \\
 & + x_{S,l+1}^{(2)} \times p_0^{(2)} \\
 & + x_I^{(2)} \times p_1^{(2)} \times (1 - \lambda^{(2)})^{t_c^{(2)} + l} \times \lambda^{(2)} \\
 & + x_I^{(2)} \times \overline{p_2^{(2)}} \times (1 - \lambda^{(2)})^{t_c^{(2)} + l} \times \lambda^{(2)} \text{ for } l = 0, 1, \dots, D-2 \\
 3) \quad x_{n,M^{(2)},W_{M^{(2)}-1}}^{(2)} & = x_{n,M^{(2)}-1,0}^{(2)} \times \overline{p_1^{(2)}} \times \frac{1}{W_{M^{(2)}}^{(2)}} \\
 x_{n,M^{(2)},W_{M^{(2)}-2}}^{(2)} & = x_{n,M^{(2)}-1,0}^{(2)} \times \overline{p_1^{(2)}} \times \frac{1}{W_{M^{(2)}}^{(2)}} + x_{n,M^{(2)},W_{M^{(2)}-1}}^{(2)} \\
 & \dots \\
 x_{n,M^{(2)},0}^{(2)} & = x_{n,M^{(2)}-1,0}^{(2)} \times \overline{p_1^{(2)}} \times \frac{1}{W_{M^{(2)}}^{(2)}} + x_{n,M^{(2)},1}^{(2)} \\
 4) \quad x_{n,M^{(2)}-1,W_{M^{(2)}-1-1}}^{(2)} & = x_{n,M^{(2)}-2,0}^{(2)} \times \overline{p_1^{(2)}} \times \frac{1}{W_{M^{(2)}-1}^{(2)}} \\
 x_{n,M^{(2)}-1,W_{M^{(2)}-1-2}}^{(2)} & = x_{n,M^{(2)}-2,0}^{(2)} \times \overline{p_1^{(2)}} \times \frac{1}{W_{M^{(2)}-1}^{(2)}} + x_{n,M^{(2)},W_{M^{(2)}-1-1}}^{(2)} \\
 & \dots \\
 x_{n,M^{(2)}-1,0}^{(2)} & = x_{n,M^{(2)}-2,0}^{(2)} \times \overline{p_1^{(2)}} \times \frac{1}{W_{M^{(2)}-1}^{(2)}} + x_{n,M^{(2)}-1,1}^{(2)} \\
 5) \quad & \dots \\
 6) \quad x_{n,2,W_2^{(2)}-1}^{(2)} & = x_{n,1,0}^{(2)} \times \overline{p_1^{(2)}} \times \frac{1}{W_2^{(2)}} \\
 x_{n,2,W_2^{(2)}-2}^{(2)} & = x_{n,1,0}^{(2)} \times \overline{p_1^{(2)}} \times \frac{1}{W_2^{(2)}} + x_{n,2,W_2^{(2)}-1}^{(2)} \\
 & \dots \\
 x_{n,2,0}^{(2)} & = x_{n,1,0}^{(2)} \times \overline{p_1^{(2)}} \times \frac{1}{W_2^{(2)}} + x_{n,2,1}^{(2)} \\
 7) \quad x_{n,1,W_1^{(2)}-1}^{(2)} & = \sum_{m=1}^M x_{n+1,m,0}^{(2)} \times p_0^{(2)} \times \frac{1}{W_1^{(2)}} \\
 & + x_{n+1,M,0}^{(2)} \times \overline{p_1^{(2)}} \times \frac{1}{W_1^{(2)}} \\
 & + x_{S,0}^{(2)} \times p_0^{(2)} \times f_n^{(2)} \times \frac{1}{W_1^{(2)}} \\
 & + \sum_{l=0}^{D-1} x_{S,l}^{(2)} \times \overline{p_1^{(2)}} \times f_n^{(2)} \times \frac{1}{W_1^{(2)}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + x_I^{(2)} \times p_1^{(2)} \times \sum_{k=1}^{t_n^{(2)}} (1-\lambda^{(2)})^{k-1} \times \lambda^{(2)} \times f_n^{(2)} \times \frac{1}{W_1^{(2)}} \\
 & + x_I^{(2)} \times \overline{p_2^{(2)}} \times \sum_{k=1}^{t_n^{(2)}} (1-\lambda^{(2)})^{k-1} \times \lambda^{(2)} \times f_n^{(2)} \times \frac{1}{W_1^{(2)}} \\
 x_{n,1,W_1^{(2)}-2}^{(2)} & = \sum_{m=1}^M x_{n+1,m,0}^{(2)} \times p_0^{(2)} \times \frac{1}{W_1^{(2)}} \\
 & + x_{n+1,M,0}^{(2)} \times \overline{p_1^{(2)}} \times \frac{1}{W_1^{(2)}} \\
 & + x_{S,0}^{(2)} \times p_0^{(2)} \times f_n^{(2)} \times \frac{1}{W_1^{(2)}} \\
 & + \sum_{l=0}^{D-1} x_{S,l}^{(2)} \times \overline{p_1^{(2)}} \times f_n^{(2)} \times \frac{1}{W_1^{(2)}} \\
 & + x_I^{(2)} \times p_1^{(2)} \times \sum_{k=1}^{t_n^{(2)}} (1-\lambda^{(2)})^{k-1} \times \lambda^{(2)} \times f_n^{(2)} \times \frac{1}{W_1^{(2)}} \\
 & + x_I^{(2)} \times \overline{p_2^{(2)}} \times \sum_{k=1}^{t_n^{(2)}} (1-\lambda^{(2)})^{k-1} \times \lambda^{(2)} \times f_n^{(2)} \times \frac{1}{W_1^{(2)}} \\
 & + x_{n,1,W_1^{(2)}-1}^{(2)} \\
 & \dots \\
 x_{n,1,0}^{(2)} & = \sum_{m=1}^M x_{n+1,m,0}^{(2)} \times p_0^{(2)} \times \frac{1}{W_1^{(2)}} \\
 & + x_{n+1,M,0}^{(2)} \times \overline{p_1^{(2)}} \times \frac{1}{W_1^{(2)}} \\
 & + x_{S,0}^{(2)} \times p_0^{(2)} \times f_n^{(2)} \times \frac{1}{W_1^{(2)}} \\
 & + \sum_{l=0}^{D-1} x_{S,l}^{(2)} \times \overline{p_1^{(2)}} \times f_n^{(2)} \times \frac{1}{W_1^{(2)}} \\
 & + x_I^{(2)} \times p_1^{(2)} \times \sum_{k=1}^{t_n^{(2)}} (1-\lambda^{(2)})^{k-1} \times \lambda^{(2)} \times f_n^{(2)} \times \frac{1}{W_1^{(2)}} \\
 & + x_I^{(2)} \times \overline{p_2^{(2)}} \times \sum_{k=1}^{t_n^{(2)}} (1-\lambda^{(2)})^k \times \lambda^{(2)} \times f_n^{(2)} \times \frac{1}{W_1^{(2)}} \\
 & + x_{n,1,1}^{(2)}
 \end{aligned}$$

◎ 저자 소개 ◎



**이 계 민 (Gyemin Lee)**

1989년 서울대학교 계산통계학과 졸업(이학학사)  
1991년 서울대학교 계산통계학과 졸업(이학석사)  
1997년 서울대학교 계산통계학과 졸업(이학박사)  
1998년 3월 ~ 현재 경상대학교 수학정보통계학부 부교수  
관심분야 : 통신공학, 확률론  
E mail : gyemin@gsnu.ac.kr



**강 영 경 (Yung-Gyung Kang)**

1988년 서울대학교 계산통계학과 졸업(이학학사)  
1990년 서울대학교 계산통계학과 졸업(이학석사)  
1996년 University of Pennsylvania 졸업(이학박사)  
1997년 8월 ~ 현재 한신대학교 정보시스템공학과 부교수  
관심분야 : 네트워크 성능평가, 데이터마이닝, 복잡계 시뮬레이션  
E mail : ykang@hs.ac.kr



**최 창 원 (Chang-Won Choi)**

1990년 고려대학교 전산과학과 졸업(이학학사)  
1992년 고려대학교 전산과학과 졸업(이학석사)  
1995년 고려대학교 컴퓨터학과 졸업(이학박사)  
1996년 3월 ~ 현재 한신대학교 정보시스템공학과 부교수  
관심분야 : 네트워크 성능평가, 정보보호, 임베디드 시스템  
E mail : won@hs.ac.kr