

# IEEE 802.11e EDCF 성능 분석과 평가

정회원 김 종 덕\*

## Performance Analysis and evaluation of the IEEE 802.11e EDCF

Jong-Deok Kim\* *Regular Members*

### 요 약

IEEE 802.11 위원회는 트래픽 클래스 별로 상이한 서비스 품질(QoS)을 제공하는 새로운 분산 MAC 방안인 EDCF를 최근 제안했다. 우리는 해석적 방법을 통해 이 새로운 방안의 성능 및 QoS 지원 특성을 분석하고 평가하고자 하였다. 이를 위해 기존 DCF 성능 분석 연구 성과를 수정 및 확장하여 임계 상황에서 EDCF의 성능을 클래스 별로 예측할 수 있는 성능 분석 모형을 개발하였다. 개발한 모형의 타당성 검증에 위해 수행한 심도 깊은 시뮬레이션 결과 모형이 매우 신뢰할 수 있는 수준으로 EDCF의 성능과 지연을 예측함을 확인하였다. 개발한 분석 모형을 활용한 평가 작업을 통해 EDCF의 특성, 특히 각종 EDCF 인자들, 즉 AIFS,  $CW_{min}$ ,  $CW_{max}$  등이 성능과 QoS에 미치는 여러 중요한 특성을 파악할 수 있었다.

Key Words : EDCF, IEEE 802.11e, MAC, QoS, Analysis

### ABSTRACT

Recently, the IEEE 802.11 working group has announced a new distributed MAC called EDCF to provide service differentiation among traffic classes. With the increasing demand for supporting Quality of Service in IEEE 802.11 wireless LANs, the EDCF is now attracting many researchers' attention due to its practical worth as a standard mechanism. In this paper, we focus on the analytical approach to evaluate the performance of the EDCF. An analytical model is developed to estimate the throughput of the EDCF in saturation (asymptotic) conditions. Extensive simulation studies have been carried out for the validation of the analysis, and they show that it estimates the throughput of the EDCF accurately. By utilizing the analytical model, we evaluate the performance of the EDCF. Specifically, we concentrate on discovering the characteristics of the EDCF parameters, such as  $CW_{min}$ ,  $CW_{max}$  and AIFS, in the way that they influence on the performance of the EDCF.

### I. 서론

광대역 무선 데이터 통신 서비스 제공을 위한 기술로 IEEE 802.11 무선 LAN에 대한 관심이 높고 실제 이를 채용한 망도 빠르게 늘고 있다. 이에 따라 IEEE 802.11 망에서 사용자의 다양한 서비스 요구를 만족시키기 위한 QoS 지원이 중요한 문제로 떠오르고 있다. QoS 문제는 여러 프로토콜 계층에서 다룰 수 있지만 우리는 이 중 MAC 계층에 초점을 맞추었

다.

1999년에 발표된 IEEE 802.11 기본 MAC 표준은 PCF(Point Coordination Function)와 DCF(Distributed Coordination Function)라는 두 가지 MAC 방안을 정의했다<sup>[1]</sup>. PCF는 중앙 제어 노드의 관리 하에 경쟁 없이 공유 매체를 사용하는 방법으로 음성과 같은 실시간 트래픽을 지원하기 위한 것이다. DCF는 CSMA/CA 기반 경쟁 방식을 통해 매체 접근을 제어하는 방법으로 일반 Best Effort 트래픽을 지

부산대학교 전자전기정보컴퓨터공학부 정보컴퓨터공학전공 이동통신연구실 (kimjd@pusan.ac.kr)

논문번호 : KICS2004-08-150, 접수일자 : 2004년 8월 13일

※본 연구는 교육부에서 주관하는 "차세대물류IT기술연구사업단"에 의해 지원 받은 연구입니다.

원하기 위한 것이다. 그런데 PCF는 성능 및 유연성에  
서 많은 문제를 노출하였고<sup>[2]</sup> 실제 현재 판매 중인  
대부분의 무선 LAN 장비에서는 이 기능을 지원하지  
않고 있다. 상위 계층의 조작을 통한 QoS 지원 연구  
기<sup>[3]</sup> 전혀 없는 것은 아니지만 MAC 계층에서 DCF  
만을 지원하는 현재의 802.11 무선 LAN에서 QoS  
지원은 아주 어려운 실정이다.

이에 따라 무선 LAN 환경에서 QoS 지원을 위한  
MAC 방안에 관한 연구, 특히 중앙 제어노드가 필요  
없는 분산 구조 방안에 대한 연구가 활발히 진행되었  
으며 그 결과 IEEE 802.11e라 불리는 새로운 확장  
표준이 발표되었다<sup>[4]</sup>. 이 확장 표준의 핵심은  
EDCF(Enhanced DCF)라는 분산 제어 구조의 QoS  
지원 MAC이라 할 수 있는데 EDCF는 구현이 쉽고  
표준이라는 장점으로 빠른 시간 안에 현실 망에 적용  
될 것으로 보인다. 그런데 이 방안의 효과적 사용을  
위해서는 EDCF의 특성 및 성능에 대한 학술적 분석,  
평가 작업이 필요하다.

그래서 우리는 해석적 방법을 통해 EDCF의 처리  
율과 지연을 클래스 별로 예측할 수 있는 성능 분석  
모형을 개발하였다. 개발한 모형의 타당성 검증은 위  
해 NS-2를<sup>[5]</sup> 이용해 심도 있는 시뮬레이션을 수행하  
였다. 검증 결과 모형은 신뢰할 수 있는 수준으로  
EDCF의 성능과 지연을 예측함을 확인할 수 있었다.  
이어 모형을 활용해 EDCF 인자를 중심으로 EDCF의  
성능 및 QoS 특성을 평가하였고 의미 있는 결과를  
도출하였다.

## II. EDCF

EDCF는 AC(Access Category)라 불리는 트래픽  
클래스 마다 서로 다른(differentiated), 즉 우선순위에  
(prioritized) 따른 매체 접근을 하도록 한다. K를 지  
원 가능한 AC의 수라 할 때 각 AC를 우선순위에 따  
라 1부터 K까지 번호를 매긴다. 높은 우선순위의 AC  
가 작은 번호를 가진다고 가정하며 따라서 AC[1]이  
가장 높은 우선순위를 가진다.

EDCF에서는 AIFS[k], CW<sub>min</sub>[k], CW<sub>max</sub>[k]라는 인  
자를 AC[k]별로 다르게 지정할 수 있는데 이들이  
AC[k]의 성능을 결정한다. EDCF서 각 AC는 인자만  
다른 DCF의 변형으로 AIFS는 기존 DCF의 DIFS에,  
CW<sub>min</sub>[k]와 CW<sub>max</sub>[k]는 CW<sub>min</sub>과 CW<sub>max</sub>에 각각 대응  
한다. 앞으로 표현의 편의를 위해 AC[k]의 세 가지  
인자, 즉 AIFS[k], CW<sub>min</sub>[k], CW<sub>max</sub>[k]에 각각 대응  
하여 A<sub>k</sub>, W<sub>k</sub>, m<sub>k</sub>라는 변수 이름을 사용한다. 여기서

A<sub>k</sub>, W<sub>k</sub>, m<sub>k</sub>는 수식 1을 만족한다. 또 이들의 조합  
[A<sub>k</sub>, W<sub>k</sub>, m<sub>k</sub>]를 AC[k]의 EDCF profile 벡터라고 하  
겠다.

$$A_k = (AIFS[k]-DIFS)/aSlotTime,$$

$$W_k = CW_{min}[k], CW_{max}[k] = 2^{m_k} \cdot W_k \quad (1)$$

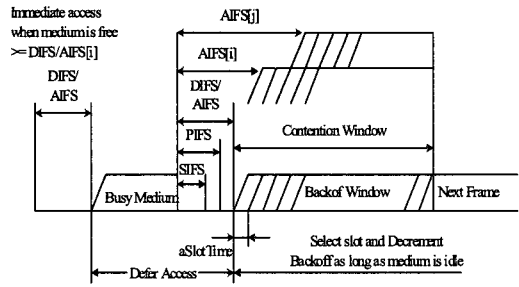


그림 1. EDCF 인자와 Backoff 관계

EDCF에서 각 AC[k]의 동작 형태는 DCF와 같다  
(그림 1 참조). 프레임 전송 요청이 도착하면 먼저 매  
체가 Idle한지 검사한다. 해당 시점에서 매체가 Idle이  
고 이후 AIFS[k] 시간 동안에도 Idle하면 해당 프레  
임을 바로 전송한다. 그러나 그 외의 경우는 바로 전  
송하지 못하고 Backoff 과정을 수행한다. Backoff 과  
정의 단말은 먼저 0에서 CW[k] 사이에서 무작위로  
추출한 정수를 이용하여 Backoff 값 b<sub>k</sub>를 결정한다  
여기서 CW[k]는 W<sub>k</sub> ≤ CW[k] ≤ 2<sup>m<sub>k</sub></sup> · W<sub>k</sub>를 만족하  
는 변수이다. 그리고 채널이 AIFS[k] 만큼 Idle하기  
를 기다린다. 채널이 AIFS[k] 시간 이후에도 계속 Idle하  
면 매 aSlotTime이 지날 때 마다 b<sub>k</sub>를 1씩 줄이다  
값이 0이 되는 순간 해당 프레임을 전송한다. b<sub>k</sub> 값이 0  
에 이르지 않았는데 다른 단말의 전송을 감지하면 b<sub>k</sub>  
값 감소를 중지하고 현재 b<sub>k</sub> 값을 유지한 채 다시  
AIFS[k] 만큼 Idle하기를 기다려 b<sub>k</sub> 값을 줄이는 것을  
반복한다.

b<sub>k</sub> 값이 0이 되어 전송을 시도하는 순간 다른 단말  
도 전송을 시도할 경우 충돌이 발생한다. 그런데 충  
돌 여부를 송신 단말이 바로 확인할 수 없기 때문에  
수신 단말로부터의 ACK 수신 여부를 통해 충돌을  
판단한다. 충돌인 경우 새로 b<sub>k</sub> 값을 구한 후 Backoff  
과정을 통해 충돌을 겪은 프레임에 대해 재전송을 시  
도한다. 이 과정에서 충돌 가능성을 낮추기 위하여  
자신의 CW[k] 값을 두 배로 늘이는데 프레임 전송이  
실패할 때 마다 두 배씩 늘어 최대 2<sup>m<sub>k</sub></sup> · W<sub>k</sub>에 이를  
수 있다. CW[k] 값은 전송이 성공하면 다시 W<sub>k</sub>로 초  
기화 시킨다.

### III. 분석

우리가 분석하고자 하는 EDCF의 성능은 "임계 상황"에서의 AC별 처리율과 지연이다. 임계 상황이란 시스템이 안정 상태를 유지한 채 수용할 수 있는 최대 부하가 주어진 상황을 의미한다. 임계 상황 조건을 이 문제에 구체적으로 적용하면 망의 모든 단말이 자신의 전송 큐에 항상 하나 이상의 전송할 프레임 가지고 있는 상황이라고 가정하였다. 이 가정은 기존에 이루어진 DCF 성능 분석 연구들에서도 적용한 것이다<sup>[6][7]</sup>. 우리의 분석 작업에서는 또 어느 정도의 근사화 및 단순화가 이루어진다. 예를 들어 개별 단말들의 동작은  $p$ -persistent CSMA로 근사하였다. 물론  $p$  값을 실제 EDCF의 Backoff 특성을 최대한 반영하도록 노력하였지만 분명 동일한 동작 형태를 실현하지는 못한다. 또 모든 단말들이 서로 직접 통신할 있고 매체 에러는 발생하지 않으며 각 단말은 하나의 EDCF Profile만을 가진다고 단순화했다. 이러한 근사화 및 단순화는 대부분 기존 DCF 분석 연구들에서도 적용한 것들이다<sup>[6][7]</sup>.

우리의 분석 작업은 여섯 단계에 걸쳐 이루어진다. 첫째 단계에서는 Slot, Slot Class, Slot Number 등의 Slot 관련 용어를 정의한다. EDCF는 기존 DCF와 마찬가지로 Slot 기반 프로토콜이다. 그러나 DCF와는 달리 AIFS 값에 따라 AC별 경쟁이 제한되는데 Slot Number와 Slot Class는 이를 고려하기 위해 정의한 것이다. 둘째 단계에서는 AC[k]인 EDCF 단말이 임의의 전송 시도에서 겪는 충돌 확률이  $c_k$ 로 일정하다는 가정을 바탕으로 개별 단말의 Backoff 동작을 Markov Chain으로 모형화한다. 이를 통해 AC[k]인 EDCF 단말의 동작을 전송 확률  $p_k$ 를 가지는  $p$ -persistent CSMA로 근사시킨다. 셋째 단계에서는 둘째 단계에서 구한 AC별 전송 확률  $p_k$ 를 이용하여 주어진 Slot이 특정 클래스에 속할 확률  $P(j)$  등을 구한다. 이를 위해 Slot Number 및 Slot Class를 추적하기 위한 또 다른 Markov Chain을 유도한다. 앞의 Markov Chain이 개별 단말의 상태 변화를 모형화하는 것으로 개별 단말의 동작에만 영향을 받는데 비해 여기서 유도한 Markov Chain은 시스템 전체 상태 변화를 모형화하는 것으로 시스템에 있는 모든 단말의 동작에 영향을 받는다. 넷째 단계에서는 둘째 단계에서 가정된 조건부 충돌 확률  $c_k$ 를 전송 확률  $p_k$  및 슬롯 확률  $P(j)$  등으로부터 유도한다. 그런데 전송 확률  $p_k$ 는 조건부 충돌 확률  $c_k$ 의 식으로 표시할 수 있

다. 즉 우리는  $p_k$ 와  $c_k$ 로 이루어진 연립 방정식을 유도할 수 있으며 이 연립 방정식은 일반적인 수치 해석의 방법을 통해 그 해를 구할 수 있다. 다섯째 단계에서는 Slot의 길이를 분석한다. 분석에서 사용하는 이산적인 관찰점이라는 측면에서 모든 Slot은 동일하다. 그러나 실제 Slot의 길이는 해당 Slot에서 발생한 사건의 종류 (Idle, 전송 성공, 충돌 중 하나), RTS/CTS 방안 적용 여부, 데이터 길이 등에 따라 달라진다. 마지막 단계에서는 앞서 유도한 각종 확률 및 Slot 길이를 활용하여 개별 AC의 임계 상황에서의 처리율과 지연을 유도한다.

#### 1. Slot, Slot Number, Slot Class

우리는 Slot을 단말이 Backoff 동작을 시작 또는 재활성 그리고 전송을 시도할 수 있는 시점, 즉 단말이 매체 사용을 위한 경쟁을 활성화시킬 수 있는 시점들에 의해 구분되는 시간 구간이라 정의한다(그림 2 참조). 이렇게 정의한 Slot들은 분석을 위한 이산적 관찰 시간 축 상에서는 모두 1의 길이를 가지지만 실제 Slot의 시간 길이는 해당 Slot에서 발생한 사건에 따라 다름에 유의해야 한다.

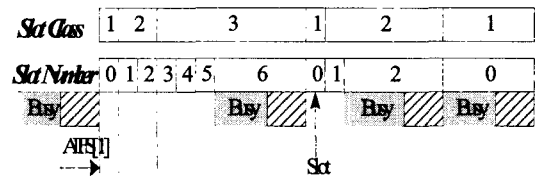
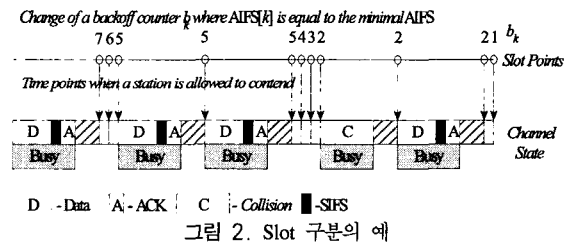


그림 3. Slot Number와 Slot Class 할당의 예

Slot Number는 Idle하지 않은 Slot을 기준으로 부여한다. 즉 Idle하지 않은 Slot 바로 다음 Slot을 0으로 하여 다음 Idle하지 않은 Slot까지 번호를 매기는데 이를 Slot Number라 정의한다. Slot Number가  $x$ 라는 의미는 이전  $x$ 개의 Slot이 Idle임을 의미한다. Slot Class  $j$ 란  $k \leq j$ 를 만족하는 AC[k] 프레임만을 전송할 수 있는 Slot을 의미한다. 그림 3은  $A_1$ 이 0,  $A_2$ 가 1 그리고  $A_3$ 가 3인 경우의 Slot Number와 Slot Class를 나타낸 것이다.

### 2. p-persistent 근사와 전송 확률 유도

AC[k]인 단말의 Backoff 동작을 모형화하기 위해  $b_k(t_k)$ 와  $s_k(t_k)$ 라는 두 Stochastic Process를 정의한다.  $b_k(t_k)$ 는 Backoff 값을 위한 Stochastic Process로  $[0, CW[k]-1]$ 의 정수 값을 가진다.  $s_k(t_k)$ 는 충돌에 따른  $CW[k]$ 의 Exponential Backoff를 표시하기 위한 것으로  $[0, m_k]$  사이의 정수 값을 가진다. AC[k]인 단말이 전송을 시도할 때 겪는 조건부 충돌 확률이 항상  $c_k$ 라는 독립이며 일정한(Independent and Stationary) 값을 가진다고 가정하자. 이 가정은 EDCF를 p-persistent CSMA로 근사하는데 있어 핵심 전제로 기존 DCF 분석 연구 성과<sup>[1]</sup>를 활용한 것이다. 우리는 개별 AC[k] 단말의 Backoff 동작을 분석하기 위하여  $\langle s_k(t_k), b_k(t_k) \rangle$ 를 하나의 상태로 하는 그림 4와 같은 Markov Chain을 유도하였다.

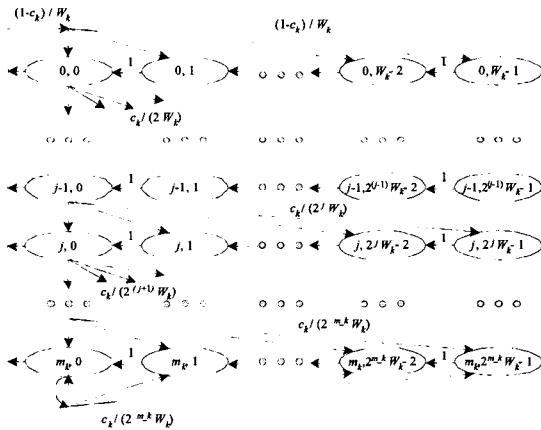


그림 4. AC[k] 단말의 Backoff 동작의 Markov Chain 모형화

Markov Chain 시스템은 안정 상태(Steady State)에서 특정 상태에 존재할 확률을 구할 수 있다.  $b_k(t_k)$ 가 0을 가지는 안정 상태 확률은 전송 가능 Slot에서의 AC[k] 단말의 전송 확률  $p_k$ 이며 수식 2로 유도할 수 있다.

$$p_k = \frac{2}{1 + W_k + c_k \cdot W_k \cdot \sum_{j=0}^{m_k-1} (2c_k)^j} \quad (2)$$

### 3. Slot 관련 확률

주어진 임의의 EDCF Profile 집합에 대하여 가능한 Slot Number를 하나의 상태로 하는 Markov Chain을 유도할 수 있다. 이를 이용하면 Slot Number 및 Class의 변화를 분석할 수 있고 관련 확률들을 구

할 수 있다. 그림 5는 K=2이고  $A_1$ 이 0,  $A_2$ 가 h인 경우에 대해 유도한 Markov Chain이다.

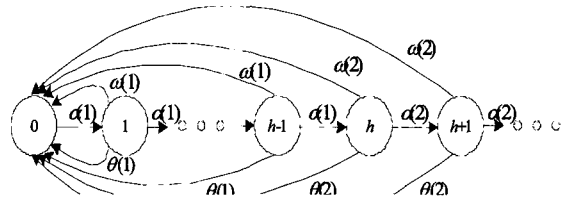


그림 5. Slot Number와 Class 분석을 위한 Markov Chain

상태 전이는 매 Slot 마다 발생하는데 해당 구간에서 발생한 사건에 따라 Idle, 전송 성공, 충돌의 세 가지 전이가 있을 수 있다. Idle인 경우 Slot Number는 1 증가하지만 나머지 경우는 0이 된다. 특정 Slot Number에서 어떠한 전이를 할지는 해당 Slot에서 경쟁할 수 있는 모든 단말의 동작 형태에 의해 정해진다. 즉 경쟁할 수 있는 단말들 중 아무도 전송을 하지 않을 경우 Idle, 하나의 단말만 전송할 경우 전송 성공, 하나 이상의 단말이 전송을 할 경우 충돌이 발생한다. 그런데 동일한 Class에 속하는 Slot에서 경쟁할 수 있는 AC와 단말은 동일하므로 동일 Class에서 각 이벤트 발생 또는 전이 확률은 같다.  $n_k$ 개의 AC[k]인 단말들 중 경쟁 가능 Slot에서 아무도 전송을 하지 않을 확률을  $\alpha_k$  하나만 전송할 확률을  $\theta_k$ 라 하면 수식 3과 같다.

$$\alpha_k = (1-p_k)^{n_k}, \quad \theta_k = n_k \cdot p_k \cdot (1-p_k)^{n_k-1} \quad (3)$$

Class j인 Slot에 발생한 사건이 Idle일 확률을  $\alpha(j)$ , 전송 성공일 확률을  $\theta(j)$ , 충돌일 확률을  $\omega(j)$ 라고 정의하자.  $\alpha(j)$ 와  $\theta(j)$ 는 앞서 구한  $\alpha_k, \theta_k$ 를 이용하여 수식 4와 같이 구할 수 있고  $\omega(j) = 1 - \alpha(j) - \theta(j)$ 인 관계에 있다.

$$\alpha(j) = \prod_{k=1}^j \alpha_k, \quad \theta(j) = \sum_{k=1}^j (\theta_k \cdot \prod_{i=1, i \neq k}^j \alpha_i) \quad (4)$$

$P(j)$ 를 임의의 Slot이 Class j에 속할 확률이라 하자.  $P(j)$ 는 그림 5와 같이 유도한 Markov Chain의 안정 상태 확률 분석을 통해 구할 수 있다. 예를 들어 K가 2인 경우  $P(1), P(2)$ 는 수식 5와 같다.

$$P(1) = \frac{(1 - (\alpha(1))^h) \cdot (1 - \alpha(2))}{1 - \alpha(2) - (\alpha(1))^{h+1} + \alpha(2) \cdot (\alpha(1))^h}, \quad P(2) = 1 - P(1) \quad (5)$$

K가 2보다 큰 경우에 대해서도 유사한 방법으로  $P(j)$ 를 유도할 수 있다.  $P(j)$  외에도 분석을 위해 Slot 관련 여러 확률 변수를 정의하고 유도하였으며 표 1에 이를 정리하였다.

표 1. Slot 관련 확률 변수

변수	수식 및 설명
$P_{idle}$	$P_{idle} = \sum_{j=1}^K \alpha(j) \cdot P(j)$ 임의의 Slot이 Idle일 확률
$P_{tr}$	$P_{tr} = 1 - P_{idle}$ 임의의 Slot이 Idle하지 않을 확률, 즉 전송성공 또는 충돌 발생 확률
$P_{tr}(j)$	$P_{tr}(j) = P(j) \cdot (1 - \alpha(j)) / P_{tr}$ Slot이 Idle일 때 그것이 Class $j$ 일 조건부 확률
$P^{suc}(j)$	$P^{suc}(j) = \theta(j) / (1 - \alpha(j))$ Class $j$ Slot에서 전송이 발생했을 때 그것이 전송 성공일 조건부 확률
$P^{coll}(j)$	$P^{coll}(j) = \omega(j) / (1 - \alpha(j))$ Class $j$ Slot에서 전송이 발생했을 때 그것이 충돌일 조건부 확률
$P_k^{suc}(j)$	$P_k^{suc}(j) = \theta(k) \cdot \prod_{i=1, i \neq k}^j \alpha_i / ((1 - \alpha(j)) \cdot P^{suc}(j))$ Class $j$ Slot에서 전송이 발생했고 전송 성공일 때 전송 성공 단말이 AC[k]일 조건부 확률

4. 조건부 충돌 확률  $c_k$  구하기

AC[k] 단말이 Class  $j$  Slot에서 전송을 시도할 때 겪는 충돌 확률을  $c_k(j)$ 라 정의하자. 개별 단말 Backoff 동작 Markov 모형화에서 가정한 충돌 확률  $c_k$ 는 조건부 확률로 정규화한  $c_k(j)$ 의 평균과 같다고 할 수 있으며 전송 확률  $p_k$ 를 이용하여 수식 6으로 유도할 수 있다.

$$c_k(j) = 1 - (\prod_{i=1}^j (1 - p_i)^n) / (1 - p_k) \quad (j \geq k),$$

$$c_k = \sum_{j=k}^K c_k(j) \cdot P(j) / \sum_{i=k}^K P(i) \quad (6)$$

즉 충돌 확률  $c_k$ 는 전송 확률  $p_k$ 의 함수이다. 이를 수식 2에 대입하면 K개의 미지수  $p_k$ 로 이루어진 K개의 다항 함수를 얻을 수 있다. 이 연립 방정식에는 해가 존재하며 그 실제 값은 일반적인 수치 해석의 방법을 통해 구할 수 있다. 우리는 이후 이루어지는 검증 및 실험 등에서 Matlab이라는 잘 알려진 수리계산용 전문 소프트웨어를 이용하여  $p_k$  및  $c_k$  값을 구하였다<sup>8)</sup>.

5. Slot 길이 분석

EDCF의 처리율 및 지연을 얻으려면 Slot의 실제 시간 길이를 구해야 한다. 한 Slot의 길이는 발생한

사건 (Idle, 전송 성공, 충돌), RTS/CTS 적용 여부, 데이터 길이 등에 의해 결정된다. 우리는 RTS/CTS 적용 여부, 가변적인 데이터 길이 등을 모두 고려한 Slot 길이 분석을 수행하였는데 이의 설명을 위해서는 많은 변수와 복잡한 수식이 필요하다. 제한된 지면을 고려하여 여기서는 RTS/CTS를 적용한 경우, 모든 데이터의 길이가 L로 일정한 경우의 Slot 길이 유도 과정만 소개한다.

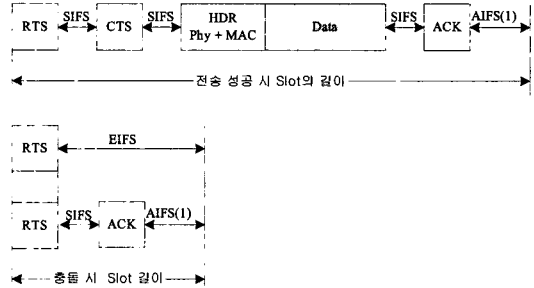


그림 6. 전송 성공 및 충돌 시 Slot 길이; RTS/CTS 적용 시

$$T_s = (RTS + CTS + H + L + Ack) / B + 3 \cdot SIFS + AIFS(1)$$

$$T_c = (RTS + Ack) / B + SIFS + AIFS(1) \quad (7)$$

Idle시 Slot 길이는 aSlotTime이다. 전송 성공 시와 충돌 시의 Slot 길이를  $T_s$ 와  $T_c$ 라고 정의하면 그림 6을 참조하여 수식 7로 유도할 수 있다. 이 결과와 앞서 구한 Slot 확률 등을 종합하면 한 Slot의 평균 길이 T를 수식 8로 최종 유도할 수 있다.

$$T = P_{idle} \cdot aSlotTime + P_{tr} \cdot (\sum_{j=1}^K P_{tr}(j) \cdot (P^{suc}(j) \cdot T_s + P^{coll}(j) \cdot T_c)) \quad (8)$$

6. 처리율(Throughput) 및 지연(Delay) 유도

AC[k]의 평균 처리율  $S_k$ 는 앞서 구한 Slot 확률 및 Slot 길이 분석 결과를 종합하여 수식 9로 최종 유도할 수 있다.

$$S_k = P_{tr} \cdot (\sum_{j=k}^K P_{tr}(j) \cdot (P^{suc}(j) \cdot P_k^{suc}(j) \cdot L)) / T \quad (9)$$

관찰 대상 단말이 AC[k] 프레임 전송할 때 걸리는 MAC 계층의 평균 지연  $D_k$ 를 유도하자. 임의의 Slot에서 AC[k]가 전송을 시도할 확률을  $q_k$ 라 하자. 전송 가능 Slot에서의 전송 시도 확률  $p_k$ 를 이용하여 임의의 Slot에 대한 평균 전송 확률  $q_k$ 를 수식 10으로 유도할 수 있다.

$$q_k = p_k \cdot \sum_{j=k}^K F(j) \quad (10)$$

주어진 Slot에 대해 관찰 대상 단말이 전송을 하지 않는다면 그 단말은 그 Slot을 기다려야 하며 그 평균 길이는 평균 Slot 길이  $T$ 라고 할 수 있다. 결국 주어진 프레임에 대해 전송을 시도할 때까지 걸리는 평균 시간  $Y_k$ 는 수식 11로 유도할 수 있다.

$$Y_k = \frac{1 - q_k}{q_k} \cdot T \quad (11)$$

평균  $Y_k$  시간을 기다린 이후 전송을 시도하였을 때 그 시도는  $c_k$ 의 확률로 실패,  $1 - c_k$ 의 확률로 성공한다. 성공일 경우 그 성공 Slot의 평균 길이  $T_s$ 를  $Y_k$ 에 더한 것을 MAC 처리 지연이라 할 수 있다. 그러나 실패일 경우 그 실패 Slot의 길이만큼을 기다린 후 다시 이전의 과정을 반복해야 한다.  $c_k$ 를 이용해 평균 충돌 횟수를 구할 수 있고 이를 사용하여  $D_k$ 를 수식 12로 최종 유도할 수 있다.

$$D_k = (Y_k + T_c) \cdot \frac{c_k}{1 - c_k} + Y_k + T_s \quad (12)$$

### 7. 시뮬레이션을 이용한 분석 결과 검증

이 절에서는 분석 결과 검증을 위해 NS-2<sup>[5]</sup>로 수행한 시뮬레이션 결과를 소개한다. 시뮬레이션에 사용한 EDCF 모듈은 기존 NS-2의 DCF 모듈을 수정해 직접 구현했다. 분석 및 이해의 편의를 위해  $K=2$ 인 경우의 실험 및 분석 결과만 소개한다. 적용한 주요 시스템 상수는 표 2와 같다.

표 2. 시뮬레이션 및 분석에 사용한 시스템 상수 값

인자	값	설명
$H$	416 bits	PHY+MAC 헤더 길이
ACK	304 bits	ACK 프레임 길이
RTS	352 bits	RTS 프레임 길이
CTS	304 bits	CTS 프레임 길이
SIFS	10 $\mu$ sec	SIFS 길이
aSlotTime, $\sigma$	20 $\mu$ sec	aSlotTime 길이
$B$	1 Mps	채널 대역폭
$L$	4000 bits	데이터 길이

시스템에는  $[A_1=0, W_1, m_1]$ 인  $n_1$ 개의 AC[1] 단말,  $[A_2=h, W_2, m_2]$ 인  $n_2$ 개의 AC[2] 단말이 있다. AC[1] 단말은 전송률이  $r_1$ 인 CBR 트래픽을, AC[2] 단말은 전송률이  $r_2$ 인 CBR 트래픽을 생성한다. 모든 단말은

고정 크기  $L$ 의 유료부하를 생성한다.

분석 결과 검증을 위한 구체적 시뮬레이션 시나리오를 소개하면  $n_1, n_2$ 의 비를 1:2로 유지한 채 전체 단말 수를 달리하며 실험을 수행했다. 각 단말은 충분히 높은 전송률로 전송하여 초기 안정화 구간 이후에는 전송 큐에 하나 이상의 프레임이 거의 1의 확률로 존재하게 했다. AIFS 값의 차이가 없는 경우와 1 차이가 나는 경우, 그리고 CW 관련 인자 값에 따라 표 3에 정리한 8가지 시나리오에 대해 시뮬레이션을 수행했다. 분석 결과와 시뮬레이션 결과의 비교를 통해 약간의 오차는 있지만 분석이 상당히 신뢰할 수 있는 수준으로 EDCF의 처리율과 지연을 예측함을 확인할 수 있었다. 오차의 원인, 즉 분석 정확도의 저해 요인은 EDCF 동작 모형의 p-persistent 근사화, 충돌 후 단말 동작의 단순화, MAC 지연 유도 과정에서의 전송 확률의 단순화 등인 것으로 생각 한다. 지면 관계상 여기서는 시나리오 #1과 #5의 결과 그래프만 소개한다.

표 3. 분석 검증 시뮬레이션 시나리오 별 EDCF Profile

시나리오	$A_2, h$	$W_1$	$m_1$	$W_2$	$m_2$
#1	0	16	1	32	3
#2	0	32	1	32	3
#3	0	32	1	64	3
#4	0	64	1	64	3
#5	1	16	1	32	3
#6	1	32	1	32	3
#7	1	32	1	64	3
#8	1	64	1	64	3

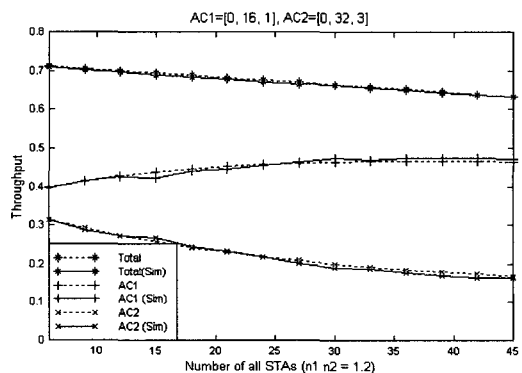


그림 7. 시나리오 #1의 분석과 시뮬레이션 처리율 결과

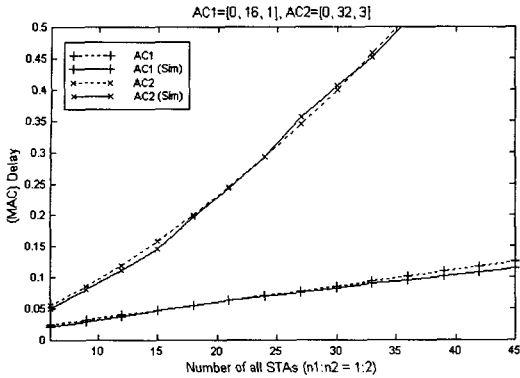


그림 8. 시나리오 #1의 분석과 시뮬레이션 지연 결과

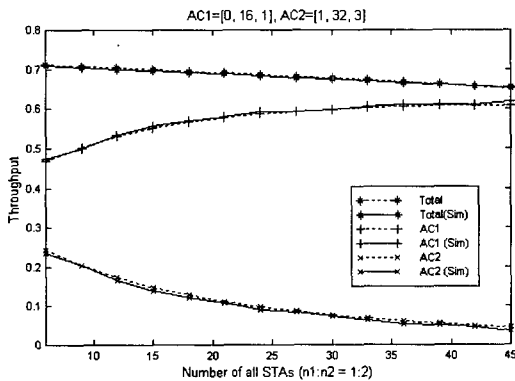


그림 9. 시나리오 #5의 분석과 시뮬레이션 처리율 결과

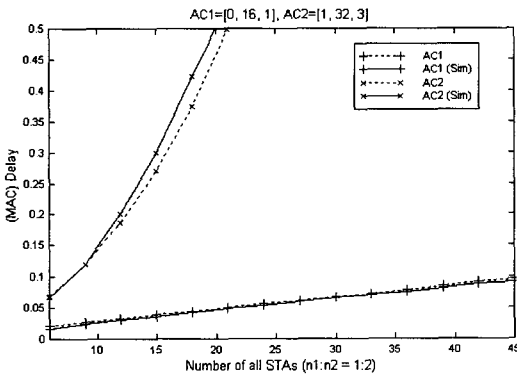


그림 10. 시나리오 #5의 분석과 시뮬레이션 지연 결과

#### IV. 평가

III장에서는 해석적 방법을 통해 EDCF 성능 분석 모형을 도출했고 시뮬레이션 결과와의 비교를 통해 그 신뢰성을 검증했다. 이 장에서는 도출한 분석 모형을 활용하여 EDCF 인자, 즉  $A_k$ ,  $W_k$ ,  $m_k$ 가 해당 AC의 서비스 품질에 미치는 영향과 그 특성을 살펴 보고자 한다. 이를 위해 먼저 서로 다른 두 AC의 성

능 비교를 위해 처리율 비  $\lambda$ 를 수식 13과 같이 정의한다.  $\lambda$ 는 서비스 품질 지원의 정량적 척도로도 활용할 수 있다. 예를 들어  $\lambda=2$ 를 목표로 한다는 것은 AC[1] 단말의 처리율이 AC[2] 단말 처리율의 두 배가 되도록 한다는 것을 의미한다.

$$\lambda = \frac{S_1/n_1}{S_2/n_2} = \frac{n_2 \cdot S_1}{n_1 \cdot S_2} \quad (13)$$

원하는  $\lambda$  값을 얻기 위해 EDCF 인자들을 어떻게 설정해야 하는지 도출한 분석 모형으로 유도할 수 있다면 상당히 유용할 것이다. 그런데 수식 13의 중요 변수로서 수식 9에서 유도한 처리율  $S_k$ 는  $A_k$ ,  $W_k$ ,  $m_k$  등의 EDCF 인자들이 아니라 전송 확률  $p_k$ , 충돌 확률  $c_k$  등 분석 과정의 중간 결과들로 이루어진다. 즉 EDCF 인자와 처리율  $S_k$ 를 바로 연계시켜 분석하기가 어렵다. 그래서 여기서는 두 단계로 나누어 EDCF 인자와 처리율  $S_k$  및 처리율 비  $\lambda$ 와의 연관 관계를 분석하고자 한다. 1단계로 중간 결과인 전송 확률  $p_k$ , 충돌 확률  $c_k$ 가 성능에 미치는 영향을 검토한다. 이어 2단계로 EDCF 인자가 이러한 중간 결과에 미치는 영향을 검토한다. 이를 종합하면 EDCF 인자와 처리율 및 처리율 비의 연관 관계를 이해할 수 있으리라 생각한다.

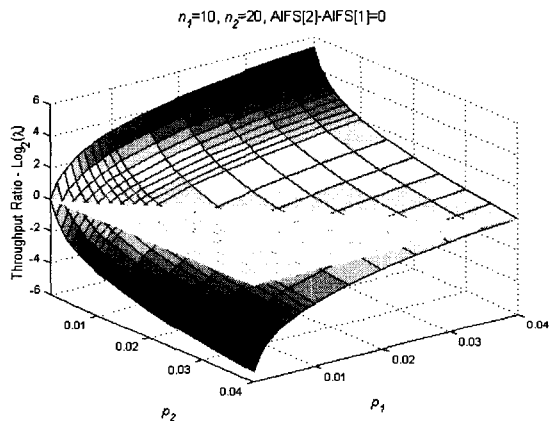


그림 11. 임의로 결정한  $p_1$ ,  $p_2$ 에 따른  $\lambda$  변화,  $h = 0$

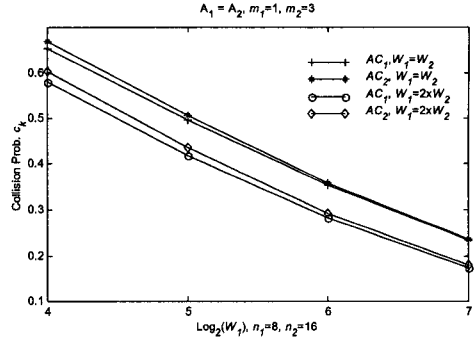
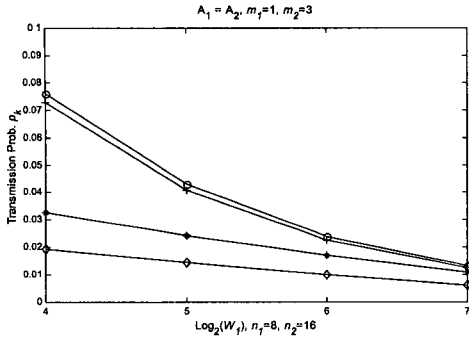


그림 13. AIFS 값이 같을 때 ( $h=0$ ) 윈도우 크기 변화에 따른 AC별 전송 확률( $p_k$ )과 충돌확률( $c_k$ )의 변화,

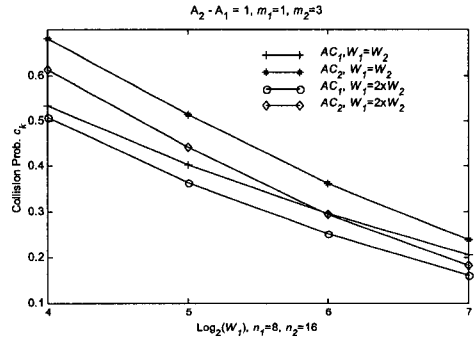
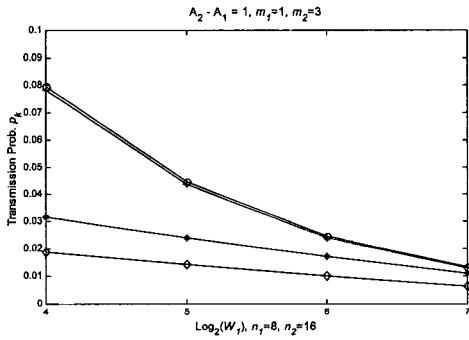


그림 14. AIFS 값이 다를 때 ( $h=1$ ) 윈도우 크기 변화에 따른 AC별 전송 확률( $p_k$ )과 충돌확률( $c_k$ )의 변화

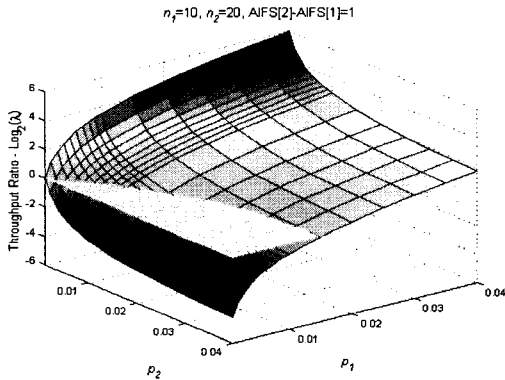


그림 12. 임의로 결정된  $p_1, p_2$ 에 따른  $\lambda$  변화,  $h = 1$

1단계를 위해 임의로  $p_k$ 를 결정할 수 있다고 가정하고 다양한  $p_k$  값에 대하여 분석 모형을 통해 성능을 구했다. 그림 11과 그림 12는 각각 AIFS가 동일한 경우( $h=0$ )와 AIFS에 차이가 있는 경우( $h=1$ )의 처리율 비  $\lambda$ 를 그린 3차원 그래프다. 그림을 통해  $p_k$  값을 조정하여 두 AC간의 성능비  $\lambda$ 를 조정할 수 있음을 알 수 있다. 또 동일한  $p_k$  값 조합이라도 AIFS의 차이가 있을 경우  $\lambda$ 에 매우 큰 영향을 미침을 그림 11과 그림 12의 비교를 통해 확인할 수 있다.

이제 2단계로 EDCF 인자가 최종 처리율 수식에

사용된 중간 결과인  $p_k$  및  $c_k$ 에 미치는 영향을 살펴보자. 그림 13과 그림 14는 각각 AIFS가 같은 경우와 다른 경우에 대해 여러  $W_k$  조합에 대해 AC별 전송 확률  $p_k$ 와 충돌확률  $c_k$ 의 변화를 그린 그래프이다. 관찰을 통해 우리는 다음과 같은 특성을 확인할 수 있다.

- CW 관련 인자, 즉  $W_k, m_k$ 의 차이는 전송확률  $p_k$  값에 명확한 차이를 가져온다.
- CW 관련 인자의 차이는 충돌확률  $c_k$  값의 차이에 거의 영향을 미치지 않는다.
- AIFS 차이는  $p_k$  값에 영향을 약간 미친다.  $p_1$ 은 좀 증가하나  $p_2$ 는 거의 변하지 않는다.
- AIFS 차이는  $c_k$  값에 명확한 차이를 가져온다.  $c_1$ 은 상당히 줄지만  $c_2$ 는 거의 변하지 않는다.

이러한 관찰로부터 전송 확률  $p_k$ 는 주로 CW 관련 인자에 영향을 받으며 충돌 확률  $c_k$ 는 AIFS의 차이에 영향을 받음을 알 수 있다.

이제 수식의 분석을 통해  $\lambda$ 를 자세히 살펴보자. AC[1]과 AC[2]간의 AIFS 차이가  $h$ 인 경우의 처리율 비  $\lambda_h$ 는 수식 13과 같이 유도할 수 있다. 특히 AC[1]과 AC[2]가 같은 AIFS 값을 가지는 경우, 즉  $\lambda_0$ 는 수식 14와 같다.



$$\lambda_h = \frac{F(1) \cdot \theta_1 + F(2) \cdot \theta_2 \cdot a_2}{F(2) \cdot \theta_2 \cdot a_1} \quad (13)$$

$$= \frac{\theta_1 \cdot a_2}{\theta_2 \cdot a_1} \times \frac{1}{a_1^h} \times (a_2 + (1-a_2) \times \sum_{i=0}^{h-1} a_1^i)$$

$$\lambda_0 = \frac{p_1(1-p_2)}{p_2(1-p_1)} = \frac{W_2 \cdot (1+c_2 \cdot \sum_{i=0}^{m_2-1} (2c_2)^i) - 1}{W_1 \cdot (1+c_1 \cdot \sum_{i=0}^{m_1-1} (2c_1)^i) - 1} \quad (14)$$

앞의 관찰에서 AIFS 값이 같은 경우 충돌 확률 ck의 차이는 거의 나지 않는다. 즉  $c_1 \approx c_2$ 이다.  $m_1$ 과  $m_2$ 가 같거나  $c_1$ 과  $c_2$ 가 충분히 작은 경우는  $\lambda_0$ 를 수식 15와 같이 근사화 할 수 있다.

$$(1+c_2 \cdot \sum_{i=0}^{m_2-1} (2c_2)^i) \approx (1+c_1 \cdot \sum_{i=0}^{m_1-1} (2c_1)^i)$$

$$\Rightarrow \lambda_0 \approx \frac{W_2-1}{W_1-1} \approx \frac{W_2}{W_1} \quad (15)$$

AIFS 차이가 미치는 영향을 살펴보기 위해  $\lambda_1$ 을 살펴보자.  $\lambda_1$ 은 수식 16과 같다.

$$\lambda_1 = \frac{p_1(1-p_2)}{p_2(1-p_1)} \cdot \frac{1}{(1-p_1)^{2 \cdot n_1}} \quad (16)$$

$\lambda_1$ 의 경우  $c_1 \approx c_2$ 가 성립하지 않기 때문에  $\lambda_0$ 에서와 같은 간략화를 할 수 없다. 그러나  $m_1, m_2$ 가 모두 0인 특별한 경우  $\lambda_1$ 은 수식 17과 같이 간략화 할 수 있다.

$$\lambda_1 = \frac{W_2-1}{W_1-1} \cdot \left( \frac{W_1}{W_1-1} \right)^{2 \cdot n_1} \quad (17)$$

수식 15와 수식 17을 통해  $\lambda_0$ 는 단말 개수에 영향을 거의 받지 않지만  $\lambda_1$ 은 직접 영향을 받음 확인할 수 있다 (그림 15 참조). 그림 16은 세 가지 단말 조합 ( $n_1:n_2$ )에 대해  $h$ 를 0에서 5까지 바꾸며 구한  $\lambda_h$ 인데 매우 유사한 증가 패턴을 보인다. 그림을 통해 단말 수 비  $n_1:n_2$ 에 관련 없이  $h$ 가 증가함에 따라  $\lambda_h$ 가 지수 증가함을 확인할 수 있다.

정리하면 AIFS 값은 CW 인자와 함께 AC 별 서비스 품질 구분을 위한 중요 인자지만 CW 인자에 비해 상대적으로 강한 영향을 끼치며 CW 인자에 비해 단말의 수에 많은 영향을 받는다. 단말의 수가 증가할수록 작은 AIFS 값을 가지는 AC에 보다 유리하게 작용하며 반대로 큰 AIFS 값을 가지는 단말들은

전송 기회를 원천적으로 박탈당해 성능이 떨어진다. 따라서 QoS를 위해 AIFS 값에 차이를 두더라도 그 차이를 크게 하는 것은 좋은 선택이 될 수는 없을 것으로 생각한다.

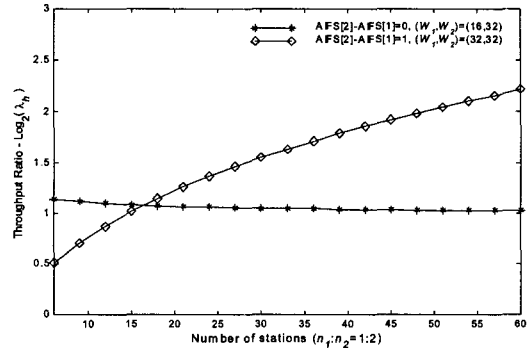


그림 17. 단말 개수에 따른  $\lambda_0$ 와  $\lambda_1$ 의 변화

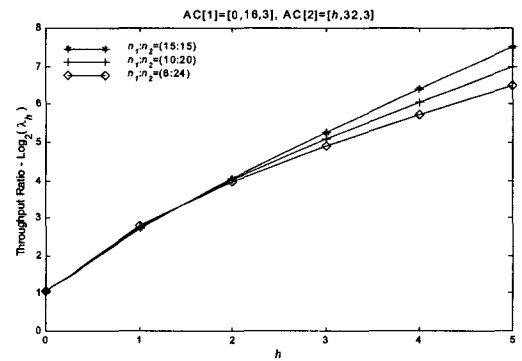


그림 16. h의 변화에 따른  $\lambda_h$ 의 변화

### V. 분석 결과의 활용

분석 개요에서 밝혔듯이 분석 결과는 임계 상황, 즉 모든 단말이 항상 전송할 프레임 가진다는 가정 하에 구한 것으로 실제 상황에서 항상 유효한 것은 아니다. 이번 장에서는 그림에도 불구하고 임계 상황 성능 분석 결과를 일반적인 비 임계 상황에서의 전송률 결정 또는 호 수락 제어 등에 활용할 수 있음을 두 가지 시뮬레이션 실험(실험 A, 실험 B)을 통해 보이고자 한다. 실험의 주요 내용은 임계 성능을 기준으로 적절한 전송률을 택하면 우선순위가 높은 AC가 낮은 AC의 전송률이나 단말 수의 증가에도 불구하고 한정된 지연 내에 안정적으로 데이터들을 전송할 수 있음을 보이는 것이다.

실험 A에서 AC[1] 단말들은 자신의 임계 성능의 70~100%로 전송하고 AC[2]들은 자신의 임계 성능의 1~5배까지 증가시키면서 전송할 때의 성능을 살펴본

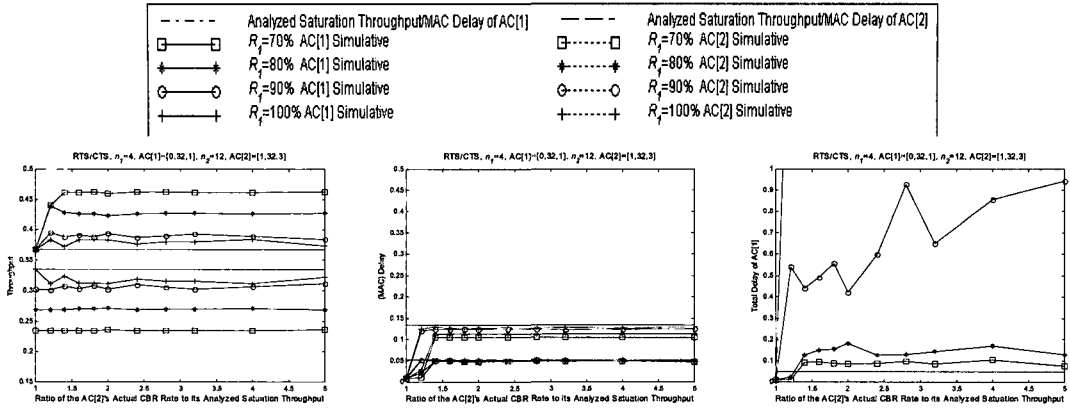


그림 17. 실험 A에서 처리율, MAC 계층 지연, 전체 지연

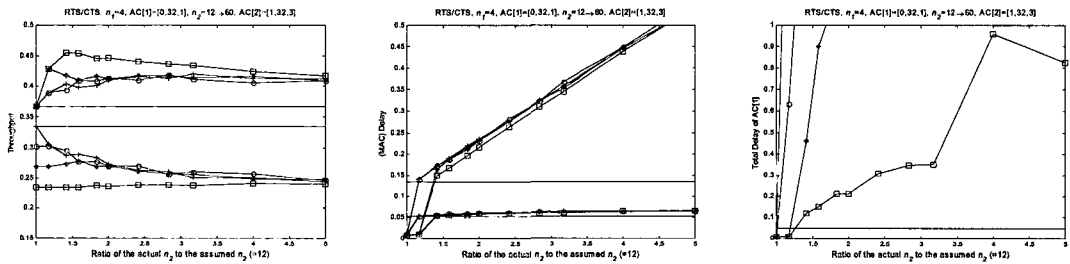


그림 18. 실험 B에서 처리율, MAC 계층 지연, 전체 지연

것으로 결과는 그림 17이다. 실험 B에서 AC[1]은  $n_2$  가  $n_1$ 의 3배라는 가정 하에 예측할 수 있는 임계 성능의 70~100%로 전송하며, AC[2]는 동일한 가정 하에 구한 임계 성능의 100%로 전송한다. 대신 실제  $n_2$  를 가정한 것의 1~5배까지 증가시키며 성능을 살펴본 것으로 결과는 그림 18이다.

관찰 결과 우선순위가 높은 단말(AC[1])이 자체 임계 성능의 70% 수준으로 전송할 경우 낮은 단말(AC[2])의 전송률(실험 A)이나 단말 수(실험 B)에 관계없이 한정된 지연 내에 데이터를 전송할 수 있었다. 상황에 따라 그 기준에 약간의 변화가 있을 수 있겠지만 전송률 결정 및 호 수락 제어 등에 임계 성능 분석 결과를 실용적으로 활용할 수 있음을 이 실험들이 잘 보여준다고 생각한다.

### VI. 결론

IEEE 802.11 무선 LAN 환경에서 QoS 지원의 필요성이 높아지고 있는 가운데 EDCF라는 새로운 QoS 지원 MAC 표준이 발표되었다. 우리는 이 방안의 성능과 QoS 지원 특성을 해석적 방법으로 분석, 평가하

는 연구를 수행하였다. 기존 DCF 성능 분석 성과를 수정 및 확장하여 EDCF 성능을 클래스 별로 예측할 수 있는 성능 분석 모형을 개발하였다. 시뮬레이션을 통한 검증 결과 개발한 모형이 매우 신뢰할 수 있는 수준으로 EDCF 성능을 예측함을 확인하였다. 이어 개발한 분석 모형을 이용하여 EDCF 인자가 성능 및 QoS에 미치는 영향을 자세히 살펴해보았다. 우리의 연구 결과는 QoS를 위한 전송률 결정 및 호 수락 제어 등에 적용할 수 있을 것으로 생각하며 향후 관련 연구에도 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

### 참고 문헌

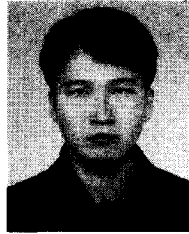
[1] *ANSI/IEEE Std 802.11, 1999 Edition, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, ISO/IEC 8802-11:1999 (E).*  
 [2] M. Visser, M. Zarki, "Voice and Data transmission over an 802.11 Wireless Network," *Proc. of IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile*

*Radio Communications*, September 1995.

- [3] S. Sharma, K. Gopalan, N. Zhu, "Quality of Service Guarantee on 802.11 Networks," *Proc. of 9th Hot Interconnects Symposium*, Stanford University, August 2001.
- [4] *Draft Supplement to IEEE Std 802.11. Medium Access Control Enhancement for Quality of Service (QoS)*, IEEE Std 802.11e/D3.1 July 2002.
- [5] S. McCanne, S. Floyd, Ns network simulator version 2.1b9a, July 2002, URL: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [6] G. Bianchi, "Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, V.18, N.3, March 2000.
- [7] F. Cali, "IEEE 802.11 Protocol: Design and Performance Evaluation of an Adaptive Backoff Mechanism," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, V. 18, N. 9, Sep. 2000.
- [8] *The Student Edition of MATLAB: The Language of Technical Computing*, The Math Works Inc, Prentice-Hall, 1997.

김 종 덕 (Jong-Deok Kim)

정회원



1994년 2월 : 서울대학교 계산통계학과 졸업  
1996년 2월 : 서울대학교 전산과 학과 석사  
2003년 2월 : 서울대학교 컴퓨터 공학과 박사  
2004년 2월~현재 : 부산대학교

정보컴퓨터공학과, 전임강사

<관심분야> 무선통신, 이동통신망, 인터넷 및 BcN