
IEEE 802.11e EDCA 무선랜의 매체 접속 지연 시간 및 정상 상태에서의 패킷 지연 분석

이우태* · 장종민* · 이계상* · 김동일* · 김창규*

Access delay and packet delay of EDCA in IEEE 802.11e wireless network

Yutae Lee* · Jong Min Jang* · Key-Sang Lee* · Dong il Kim* · Chang Kyu Kim*

이 논문은 2006 년도 동의대학교 교내연구비(과제번호 2006AA152)와 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업(IITA-2008-C1090-0801-0013)의 연구결과로 수행되었음.

요 약

본 논문은 IEEE 802.11e 무선랜 환경에서 단말 수에 따른 각 AC(Access Category)별 포화 상태의 시스템 처리율과 관련한 기존 결과에 기반을 두어, IEEE 802.11e 무선랜 네트워크에서의 패킷 전송 시간 간격을 통해, 각 AC별 매체 접속 지연 시간을 유도한다. 이 매체 접속 지연 시간을 서비스 시간으로 갖는 대기행렬모형을 이용하여, 정상 상태에서의 각 AC별 대기열의 길이와 패킷 지연 시간을 유도한다. 또한, 수치 해석과 모의실험을 통하여 모형의 정확성을 검증하고 각 AC별 성능을 분석한다.

ABSTRACT

This paper derives medium access delay of each AC(Access Category) in a stationary station using inter-departure time of IEEE 802.11e WLAN(Wireless LAN). Inter-departure time of IEEE 802.11e WLAN is obtained using saturation throughput of IEEE 802.11e WLAN which was the topic of our prior work. By using a simple queueing model, we evaluate mean queue length and mean delay for each AC on stationary condition. We calculate performance of each AC using this simple model and validate results using simulation.

키워드

IEEE 802.11e EDCA, Wireless LAN QoS, Queueing theory

I. 서론

무선액세스기술의 발달로 많은 사용자가 이동 중에도 인터넷을 통해 다양한 서비스를 받고 있다. IEEE 802.11 무선랜[1]은 설치 및 관리의 편리성과 낮은 유지 비용으로 무선랜의 확산에 크게 기여하였다. 최근 다양

한 애플리케이션은 무선랜 환경에서의 서비스 품질(QoS)에 대한 요구사항을 증가시키고 있다. 802.11 무선랜은 일반적인 최선형(best-effort) 데이터 전달 서비스는 제공하였으나 VoIP(Voice over Internet Protocol)나 동영상 스트리밍 서비스와 같은 QoS를 요구하는 데이터의 전달에 관한 기능을 제공하지 않았다. 802.11 무선랜 환

경에서 QoS를 보장하는 전달 서비스를 제공하기 위해 IEEE는 802.11 무선랜에 QoS 지원이 추가된 802.11e를 표준화 하였다.

IEEE 802.11e는 QoS지원을 위해 IEEE 802.11의 DCF(Distributed Coordination Function)를 확장하는 HCF(Hybrid Coordination Function)를 정의한다. HCF는 경쟁 기반 접근 방법인 EDCA (Enhanced Distributed Channel Access)와 폴링 기반 접근 방법인 HCCA(HCF Controlled Channel Access)를 포함하고 있다. EDCA가 패킷에 대한 차등화된 우선순위를 지정하여 QoS를 보장하고 있지만 경쟁 기반 메커니즘의 특성으로 인해 단말의 수가 증가함에 따라 데이터 전달에 심각한 지연을 일으킬 수 있으므로, 단말의 패킷 전달 지연 시간이나 대기열의 길이, 시스템 처리율 등 네트워크 성능을 분석하는 것이 필요하다. 최근까지 많은 연구에서 802.11e EDCA 메커니즘의 분석을 다루었다. Xiao [2]는 Bianchi 모델 [3]을 수정하여 여러 클래스 간에 자원 공유를 모델링 하였다. Mangold [4]는 독립된 일차 마코프 체인을 도입하여 Bianchi 모델과 함께 패킷 크기의 변화가 시스템 성능에 미치는 영향을 파악하였다. Robinson 과 Randhawa [5]는 Bianchi 모델을 확장하여 EDCA 메커니즘의 포화 상태 성능을 분석하였다. Xiao [6]는 EDCA 메커니즘에서 경쟁 윈도우 크기의 변화가 시스템 성능에 미치는 영향을 분석하기 위한 모델을 개발하였다. Kong et al. [7]은 충돌 확률이 시스템 상태와 무관하다고 가정하면서 차등화된 서비스 트래픽의 시스템 처리율 성능을 분석하였다. 하지만, 충돌 확률은 임의의 접근 시간(AIFS) 기간이 경과하여 백오프 과정 중에 있는 단말의 수에 따라 서로 다른 값을 가지게 된다. Tao and Panwar [8]는 재전송 횟수를 제한하지 않고 최대 백오프 윈도우 상태에서 계속 재전송 할 수 있다는 가정 하에 802.11e EDCA의 마코프 체인 모델을 제안하여 포화 상태에서의 시스템 처리율을 계산하였다. Lee et al. [9]은 802.11e EDCA의 시스템 처리율 분석을 위한 3차 마코프 체인 모델을 소개하였다. 이 모델은 충돌 확률이 각 AC의 우선순위와 시간에 따라 달라진다는 사실을 고려하여, 각 AC의 우선순위에 따른 시스템 처리율을 계산할 수 있었으며 단말 내부의 AC간의 가상 충돌도 고려하였다. IEEE 802.11e EDCA 관련 연구 대부분은 시스템이 포화 상태에 있다고 가정하여 시스템의 처리율을 분석하였다.

본 논문에서는 IEEE 802.11e EDCA 메커니즘에서 각 AC의 매체 접속 지연 시간을 포화 상태에서 구한다. 또한 정상 상태에서의 각 AC별 성능을 분석하기 위해, 하나의 단말이 정상 상태에 있고 나머지 단말들이 포화 상태에 있는 네트워크 환경을 고려한다. 따라서 여기서 구한 정상 상태 단말의 성능은 최악의 경우를 고려한 worst-case의 성능이 될 것이다. 정상 상태에 있는 하나의 단말을 제외 한 나머지 단말들이 모두 포화 상태에 있다고 가정하였으므로, 정상 상태 단말에 속한 각 AC의 서비스 시간을 포화 상태에서의 매체 접속 지연 시간으로 하여 해당 AC를 대기 행렬 모형으로 모형화 할 수 있다. 이러한 대기 행렬 모형의 분석을 통하여, 정상 상태에서 각 AC별 대기열의 길이 및 패킷 지연 시간을 계산한다. 수학적 분석 결과는 모의실험을 사용하여 검증한다.

II. EDCA 매체 접속 제어 방식

EDCA 메커니즘은 한 단말 내에 패킷 전달을 위해서 경쟁하는 4개의 AC를 정의한다. 단말 내부에서 생성된 패킷은 필요한 전달 서비스의 성격에 따라 4개의 AC에 해당하는 독립적인 버퍼 중 하나에 할당된다. 각 AC는 버퍼에 있는 패킷의 전송을 위해 독립적인 백오프 과정을 수행한다. EDCA는 각 AC의 우선순위에 따라 채널 접근 시점을 결정하기 위하여 백오프 과정에 사용되는 EDCA 파라미터를 조정한다. EDCA 파라미터에는 AIFS(Arbitration Inter-Frame Space), 최대 및 최소 경쟁 윈도우 크기(CW_{min} , CW_{max}), 최대 재전송 허용 횟수(M_{max}) 등이 있다. AIFS는 해당 AC가 전송을 시작하거나 백오프 카운터를 줄이기 전에 채널이 유희 상태로 유지되어야 하는 시간이며, CW_{min} 과 CW_{max} 는 각각 백오프 카운터가 선택되는 초기 상한 값과 최대 상한 값이다. M_{max} 는 특정 패킷의 전송 시도에 대하여 충돌을 경험한 AC가 해당 패킷의 재전송을 시도할 수 있는 최대 재전송 횟수이다.

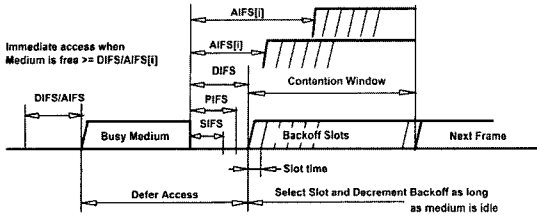


그림 1. EDCA 백오프 과정[1]
Fig. 1. EDCA backoff procedure[1]

그림 1 은 AC의 백오프 과정을 나타내고 있다. 각 AC는 채널 사용을 감지한 후 채널이 유휴 상태가 되면 AIFS 시간만큼 더 기다린다. 만약 AIFS 시간 동안 채널이 사용되지 않음을 감지하면 전달할 패킷이 있는 AC는 즉시 패킷 전송을 시작한다. 그러나 AIFS 시간 동안 다른 단말이나 단말 내부의 다른 AC의 채널 사용을 감지하면 백오프 과정을 수행해야 한다.

백오프 과정을 수행하기 위해 각 AC는 자신의 AIFS 시간 동안 채널이 유휴 상태가 되는지 판단한다. 슬롯 경계에서 해당 AC의 AIFS 시간 동안 채널이 유휴 상태가 되면 그 AC는 백오프 카운터를 설정한다. 각 AC는 매 타임 슬롯의 경계에서 해당 타임 슬롯이 유휴 상태였는지를 판단한다. 만약 해당 타임 슬롯이 유휴 상태였다면 AC는 자신의 백오프 카운터를 하나 줄일 수 있다. 하지만 해당 타임 슬롯이 유휴 상태가 아니라면 AC는 백오프 카운터를 줄이던 일을 멈추고 채널 사용이 끝나기를 기다린다. AC는 AIFS 시간 동안 채널이 다시 유휴 상태가 되면 새로운 백오프 카운터를 선택하지 않고 이전에 줄이던 백오프 카운터로부터 슬롯 경계에서 백오프 카운터를 줄여 나간다. 만약 타임 슬롯의 경계에서 백오프 카운터가 0이 되면 AC는 패킷을 전송할 수 있다. 백오프 카운터는 0에서 경쟁 윈도우 CW-1 사이에서 균일하게 선택된다. CW는 단말의 재전송 횟수 m에 따라 $CW = \min(2^{m*} CW_{min}, CW_{max})$ 와 같이 선택된다. 여기서, CW_{min} 과 CW_{max} 는 각각 최소 경쟁 윈도우 크기와 최대 경쟁 윈도우 크기이다. 단말의 재전송 횟수 m이 M_{max} 와 같은 경우, 해당 AC의 재전송이 실패하면 패킷을 폐기 시키고 더 이상 재전송을 시도하지 않는다. 한 단말 내부에서 2개 이상의 AC가 패킷을 전송할 기회가 되면 단말 내부에서 충돌을 경험하게 되는데, 이 현상을 가상 충돌이라고 부른다. 이 경우 우선순위가 높은

AC는 경쟁에서 이긴 것으로 처리하고 낮은 우선순위의 AC는 충돌을 경험한 것으로 처리함으로써 우선순위가 높은 AC의 전송 확률을 높일 수 있다.

III. 포화 상태에서의 매체 접속 지연 시간

Lee et al. [9]은 IEEE 802.11e EDCA 메커니즘의 가상 충돌을 고려한 포화 상태의 성능 분석을 위해 시스템을 3차 마코프 체인으로 모델링하였다. 이 모델은 QoS 제공을 위한 IEEE 802.11e EDCA의 주요 특징인 AIFS, 최소 및 최대 경쟁 윈도우 크기, 가상 충돌 등을 고려하였다.

각 단말은 서로 다른 AC에 대응하는 4개의 독립적인 버퍼를 가지며, $AIFS[AC_0] = DIFS + \sigma$ 이고 $AIFS[AC_l] = DIFS, l = 1, 2, 3$ 로 가정하였다. 여기서 σ 는 한 슬롯 시간을 나타낸다. 이러한 가정 하에서 Lee et al. [9]은 포화 상태에서 각 AC의 시스템 처리율을 다음과 같이 얻었다.

$$S[AC_l] = \frac{E[P][P_0 P_{S_0}[AC_l] + P_1 P_{S_1}[AC_l]]}{P_{I_0} + P_S T_S + P_C T_C} \quad (1)$$

여기서, $E[P]$ 는 패킷 페이로드의 평균 길이를 나타내고, P_0 와 P_1 는 각각 임의의 슬롯이 AC_0 의 AIFS 기간 중에 있을 확률과 그렇지 않을 확률을 나타낸다. 또한 $P_{S_0}[AC_l]$ 은 AC_0 의 AIFS 기간 중에 있는 슬롯에서 AC_l 에 속한 패킷의 성공적인 전송이 이루어질 확률이고, $P_{S_1}[AC_l]$ 은 AC_0 의 AIFS 기간 중에 있지 않은 슬롯에서 AC_l 에 속한 패킷의 성공적인 전송이 이루어질 확률이다. P_l 는 임의의 슬롯이 유휴 상태일 확률이고, P_S 는 임의의 슬롯에서 성공적인 전송이 이루어질 확률이며, P_C 는 임의의 슬롯에서 충돌이 일어날 확률이다.

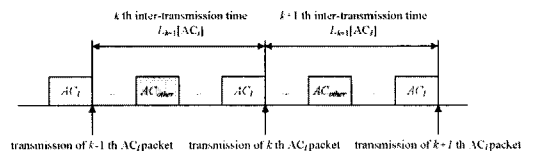


그림 2. AC_l 패킷의 매체 접속 시간 간격
Fig. 2. Inter-access time of AC_l

본 논문에서는 각 AC의 평균 매체 접속 지연 시간을 구하기 위해, 네트워크에서 각 AC의 전송 간격 시간을 해당 AC에 속하는 패킷이 성공적으로 전송된 시점 사이의 기간으로 정의한다.

그림 2에서 $L_k[AC_i]$ 은 AC_i 의 k-1 번째 전송 시점과 k 번째 전송 시점의 시간 차이를 나타낸다. $\{L_k[AC_i], k \geq 1\}$ 은 양의 실수들의 집합을 표본공간으로 가지는 이산 시각 연속 확률 과정이다. AC_i 의 시스템 처리율 $S[AC_i]$ 은 AC_i 의 평균 전송 간격 시간 $E[L[AC_i]]$ 에 의해 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$S[AC_i] = \frac{E[P]}{E[L[AC_i]]} \quad (2)$$

따라서 전체 네트워크에서 AC_i 에 속하는 패킷의 평균 전송 간격 시간은

$$E[L[AC_i]] = \frac{E[P]}{S[AC_i]} \quad (3)$$

가 된다. 따라서 AC_i 을 지원하는 단말의 수를 $n[AC_i]$ 이라고 하면, 포화 상태에서 특정 단말의 AC_i 에 속하는 패킷의 평균 매체 접속 지연 시간 $D_{MAC}[AC_i]$ 은 다음과 같다.

$$D_{MAC}[AC_i] = \frac{n[AC_i]E[P]}{S[AC_i]} \quad (4)$$

IV. 정상 상태에서의 대기열 길이와 패킷 지연 시간

본 절에서는 시스템이 정상 상태일 때, 각 AC의 성능을 분석한다. 정상 상태에서의 각 AC별 성능을 분석하기 위해, 하나의 단말이 정상 상태에 있고 나머지 단말들이 포화 상태에 있는 IEEE 802.11e EDCA 네트워크를 고려한다. 이러한 상황 하에서의 시스템을 분석하기 위해 각 AC를 대기행렬 모형으로 모델링 한다. 정상 상태에 있는 하나의 단말을 제외한 나머지 단말들이 모두 포화

상태에 있다고 가정하였으므로, 정상 상태 단말에 속하는 각 AC의 서비스 시간을 해당 AC의 포화 상태에서의 매체 접속 지연 시간으로 근사화 할 수 있다. 따라서 정상 상태에 있는 AC_i 의 서비스 시간의 분포를 3절에서 분석한 포화 상태에서의 AC_i 의 평균 매체 접속 지연 시간 $D_{MAC}[AC_i]$ 을 평균으로 하는 지수 분포를 따르는 것으로 모형화 한다. 이것은 정상 상태에 있는 단말에 속하는 AC_i 의 버퍼에 전송할 패킷이 들어오면 일시적으로 시스템의 모든 단말이 포화 상태에 있는 것과 유사하기 때문에 제안한 모형의 서비스 시간의 평균을 포화 상태에서의 평균 매체 접속 지연 시간으로 가정할 수 있다. AC_i 에 도착하는 패킷의 도착 과정을 도착율이 λ 인 Poisson 과정으로 모형화 한다. 모형화한 대기 행렬 모형이 안정 상태에 있을 조건은 $\lambda_i D_{MAC}[AC_i] < 1$ 이다.

해당 대기 행렬 모형의 분석에 의하면, 임의의 시점에서 AC_i 의 버퍼에 있는 패킷 수의 평균 $E[N_i]$ 과 패킷 수의 분산 $Var[N_i]$ 은 다음과 같다.

$$E[N_i] = \frac{\lambda_i D_{MAC}[AC_i]}{[1 - \lambda_i D_{MAC}[AC_i]]} \quad (5)$$

$$Var[N_i] = \frac{\lambda_i D_{MAC}[AC_i]}{[1 - \lambda_i D_{MAC}[AC_i]]^2} \quad (6)$$

AC_i 에 속하는 임의의 패킷이 전송될 때까지 걸리는 평균 시간 $D[AC_i]$ 은 Little의 법칙[10]에 의하여 다음이 된다.

$$D[AC_i] = \frac{D_{MAC}[AC_i]}{1 - \lambda_i D_{MAC}[AC_i]} \quad (7)$$

V. 수치 해석 및 모의실험

제안한 모델을 검증하기 위하여 표 1에 제시한 시스템 파라미터를 이용하여, 수치 해석과 C++를 이용한 모의실험을 수행하였다. 본 절에서는 RTS/CTS 메커니즘을 사용하는 20개의 단말이 존재하고, 그 중 1개의 단말을 제외한 다른 모든 단말이 포화 상태에 있다고 가정한다. 각 AC의 패킷 도착율이 같다고 가정된 상황에서 하

나의 정상 상태 단말에 속하는 패킷 도착율을 변화시키면서 수치 해석과 모의실험을 수행한다. 그림 3과 4에서 볼 수 있듯이 수학적 분석을 사용하여 구한 대기열의 길이와 패킷 지연 시간이 모의실험의 결과와 동일한 추세를 따르며 이는 제안한 모델이 실제의 시스템을 비교적 잘 예측할 수 있음을 알려준다.

표 1. 시스템 파라미터
Table 1. System Parameters

Payload size	8000 bits
Phy header	192 bits
MAC header	272 bits
RTS frame	Phy header + 160 bits
CTS frame	Phy header + 112 bits
ACK frame	Phy header + 112 bits
타입 슬롯	20e-6 sec
SIFS	10e-6 sec
DIFS	50e-6 sec
채널 데이터율	1bit/ms
$CW_{min}[AC_0]; CW_{min}[AC_1]$ $CW_{min}[AC_2]; CW_{min}[AC_3]$	32;32 16;8
$CW_{max}[AC_0]; CW_{max}[AC_1]$ $CW_{max}[AC_2]; CW_{max}[AC_3]$	1024;1024 256;128
$m[AC_i]$ for all i	5

그림 3은 각 AC의 평균 대기열의 길이를 나타낸다. 우선순위가 가장 낮은 AC_0 의 평균 큐 길이는 0.09 pkts/sec의 패킷 도착율에서 발산함을 볼 수 있다. 이는 표 1에서 주어진 시스템 환경에서 AC_0 가 낮은 우선순위로 인해 0.09 pkts/sec의 패킷 도착율에서 포화 상태에 도달한다는 것을 알 수 있다. 따라서 그림 4에서도 나타나듯이 AC_0 의 평균 패킷 지연 시간은 패킷의 도착율이 증가함에 따라 증가하며 도착율 0.09 pkts/sec에서 발산하게 된다. AC_0 에 비해 우선순위가 높은 다른 AC들은 AC_0 에 비해 더 높은 데이터 도착율에서 매체 접속 지연 시간이 발산함을 볼 수 있다. 따라서 정상 상태에 속한 단말 내의 각 AC들에 우선순위에 따른 QoS가 보장됨을 볼 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 IEEE 802.11e 무선랜 환경에서 단말수에 따른 각 AC별 포화 상태의 시스템 처리율에 대한 기존 결과에 기반을 두어, 네트워크에서의 패킷 전송 시간 간격을 통해, 각 AC별 평균 매체 접속 지연 시간을 유도하였다. 유도된 평균 매체 접속 지연 시간을 이용하여 정상 상태에서의 각 AC별 대기열의 길이와 패킷 지연 시간을 유도하였고, 본 논문의 수학적 모형을 모의실험을 통하여 검증하였다.

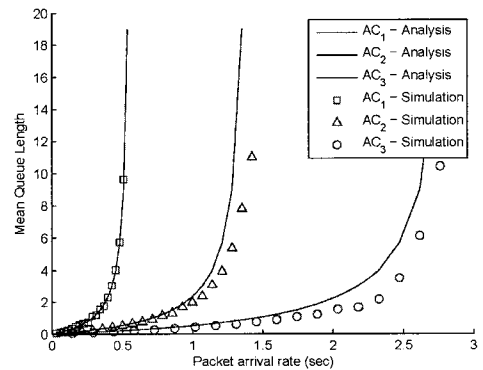
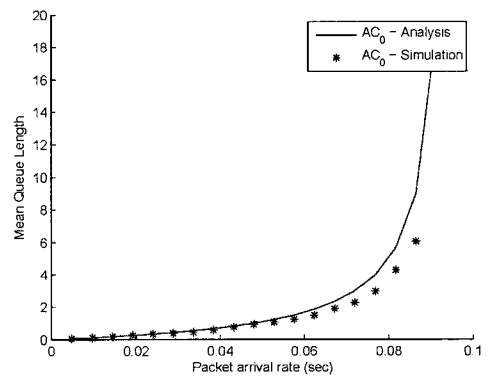


그림 3. 각 AC별 대기열의 길이
Fig. 3. Mean Queue length for each AC

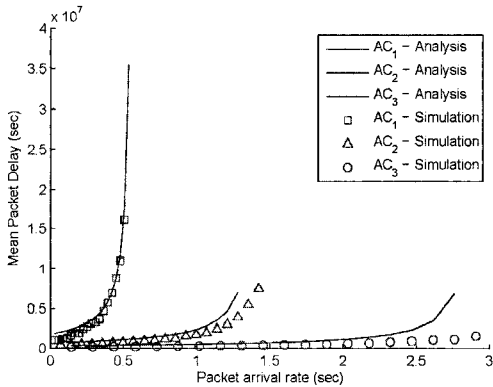
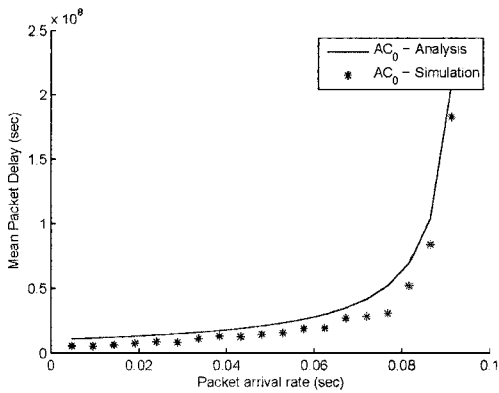


그림 4. 각 AC별 평균 패킷 지연 시간
Fig. 4 Mean Packet delay for each AC

[4] Mangold, S., Hiertz, G., Walke, B., "IEEE 802.11e wireless LAN-Resource sharing with contention based medium access," Proc. IEEE PIMRC 2003, Beijing China, pp. 2019-2026, Sep. 2003.

[5] Robinson, J. W., Randhawa, T. S., "Saturation throughput analysis of IEEE 802.11e enhanced distributed coordination function," IEEE J. Select. Areas Commun. 22(5) pp. 917-928, 2004.

[6] Xiao, Y., "Performance analysis of IEEE 802.11e EDCF under saturation condition," Proc. ICC 2004, Paris, France, Jun. 2004.

[7] Kong, Z., Tsang, D. H. K., Bensaou, B., Gao, D., "Performance analysis of IEEE 802.11e contention-based channel access," IEEE J. Select. Areas Commun. 22(10) pp. 2095-2106, 2004.

[8] Tao, Z., Panwar, S., "Throughput and delay analysis for the IEEE 802.11e enhanced distributed channel access," IEEE Transactions on Communications 54(4) pp. 596-603, 2006.

[9] Lee, Y., Lee, K.-S., and Jang, J.M. "Saturation throughput analysis of IEEE 802.11e EDCA, Advanced Intelligent Computing Theories and Applications. With Aspects of Artificial Intelligence," pp. 1223-1232, 2007.

[10] Little, J.D.C. "A proof of the queueing formular $L = \lambda W$," Operations Research 9 pp. 383-387, 1961.

참고문헌

[1] IEEE 802.11 Standard Part II, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," 2007.

[2] Xiao, Y., "Enhanced DCF of IEEE 802.11e to support QoS," Proc. IEEE WCNC 2003, LA USA, pp. 1291-1296, Mar. 2003.

[3] Bianchi, G., "Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function," IEEE J. Select. Areas Commun. 18, pp. 535-547, 2000.

저자소개



이유태(Yutae Lee)

1994년 한국과학기술원 수학과 (이학석사)
1997년 한국과학기술원 수학과 (이학박사)

2001년~현재 동의대학교 정보통신공학과 부교수
※ 관심분야 : Opportunistic Spectrum Access



장종민(Jong Min Jang)

2006년 동의대학교 정보통신공학과
(공학사)

2006년~현재 동의대학교 대학원 정보
통신공학과 석사과정

※ 관심분야: MAC, 네트워크 성능 분석



이계상(Key-Sang Lee)

1981년 서울대학교 전자공학과
(공학석사)

1997년 한국과학기술원 전기및전자
공학 (공학박사)

1997년~현재 동의대학교 정보통신공학과 부교수

※ 관심분야: Internetworking, MESH 네트워크



김동일(Dong il Kim)

1983년 광운대학교 전자통신공학과
(공학석사)

1992년 광운대학교 전자통신공학과
(공학박사)

1991년~현재 동의대학교 정보통신공학과 교수

※ 관심분야: 통신망 성능분석, 무선망 프로토콜, IT네트워크 기술 표준화



김창규(Chang kyu Kim)

1986년 한양대학교 전자공학과
(공학석사)

1989년 한양대학교 전자공학과
(공학박사)

1988년~현재 동의대학교 정보통신공학과 교수

※ 관심분야: 정보보호