

논문 2004-41TC-8-2

# IEEE 802.11 DCF의 성능 향상을 위한 가상 그룹 방법

## (A Virtual Grouping Scheme for Improving the Performance of IEEE 802.11 Distributed Coordination Function)

김 선 명\*, 조 영 중\*

(Sun-Myeng Kim and Young-Jong Cho)

## 요 약

IEEE 802.11 DCF(Distributed Coordination Function) 프로토콜은 무선 매체의 공유를 위하여 단말간 경쟁기반의 분산 채널 접근 방법을 제공한다. 그러나, 이 방법은 단말 수가 증가함에 따라 많은 충돌(Collision)을 야기한다. 따라서, 지연, 지터 그리고 효율측면에서 IEEE 802.11 DCF의 성능은 급격하게 감소한다. 본 논문에서는 IEEE 802.11 DCF 시스템의 성능을 향상시키기 위해 간단하고 효율적인 DCF/VG(Distributed Coordination Function with Virtual Group) 방법을 제안한다. 제안하는 방법에서, 각 단말은 캐리어 검출을 통해 현재 채널의 경쟁 수준(Contention Level)을 측정하고 경쟁 수준에 따라 독립적으로 가상 그룹 주기(Virtual Group Cycle)를 결정한다. 가상 그룹 주기는 하나 이상의 가상 그룹들로 이루어지며 하나의 가상 그룹은 한번의 유휴 기간(Idle Period)과 한번의 번잡 기간(Busy Period)을 갖는다. 단말은 가상 그룹 주기 중에서 자신이 선택한 가상 그룹에서만 동작하며 다른 그룹에서는 동작하지 않는다. 즉, 단말이 선택한 가상 그룹에서는 IEEE 802.11 DCF처럼 유휴 슬롯을 검출하면 백오프 카운터(Backoff Counter)를 감소시키고 백오프 카운터가 0이 되면 데이터 패킷을 전송한다. 그러나 다른 가상 그룹에서는 유휴 슬롯을 검출하더라도 백오프 카운터를 감소시키지 않는다. 제안하는 방법을 수학적 분석과 시뮬레이션을 통해 IEEE 802.11 DCF와 성능을 비교 분석한다. 성능 비교 분석 결과, 제안하는 방법이 다양한 경쟁 수준 환경에서 높은 효율과 낮은 지연 및 지터를 가짐을 확인하였다.

## Abstract

The IEEE 802.11 Distributed Coordination Function(DCF) protocol provides a contention-based distribution channel access mechanism for stations to share the wireless medium. However, the performance of the DCF drops dramatically in terms of throughput, delay and delay jitter as the number of active stations becomes large. In this paper, we propose a simple and effective scheme, called DCF/VG(Distributed Coordination Function with Virtual Group), for improving the performance of the IEEE 802.11 DCF mechanism. In this scheme, each station independently decides the virtual group cycle using the information provided by the carrier sensing mechanism. The virtual group cycle consists of one or more virtual groups and a virtual group includes an idle period and a busy period. Each station operates in only one out of several virtual groups of the virtual group cycle and does not operate in the others. In other words, each station decreases its backoff counter and tries to transmit a packet only in its virtual group like the IEEE 802.11 DCF. Performance of the proposed scheme is investigated by numerical analysis and simulation. Numerical and simulation results show that the proposed scheme is very effective and has high throughput and low delay and jitter under a wide range of contention level.

**Keywords** : Backoff Algorithm, DCF, MAC, Virtual Group, Wireless LAN

## I. 서 론

무선 랜을 위한 IEEE 802.11 표준은 단말 간의 하나의 채널을 공유하기 위해 MAC (Medium Access Control) 프로토콜을 제공한다<sup>[1]</sup>. IEEE 802.11 MAC 계층 프로토콜은 다양한 물리 계층에 대해 비동기, 시간 제한적 그리고 비경쟁 접근 방법을 제공한다. IEEE 802.11 표준의 기본 접근 방법은 CSMA/CA(Carrier

\* 정회원, 아주대학교 정보통신공학과  
(Department of Information and Communication,  
Ajou University)  
접수일자: 2004년3월4일, 수정완료일: 2004년8월2일

Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 방식의 DCF (Distributed Coordination Function) 이다. IEEE 802.11 DCF에서, 매체에 대한 패킷 충돌은 이진 지수 백오프 (Binary Exponential Backoff) 알고리즘으로 해결된다. 전송할 패킷을 가지고 있는 단말은 전송을 시도하기 전에 매체가 유휴 상태인지를 확인해야 한다. 단말은 현재 경쟁 윈도우(Contention Window)보다 작은 랜덤 백오프 카운터를 균등 분포에 따라 선택하고 매체가 유휴 상태이면 매 슬롯마다 백오프 카운터를 하나씩 감소한다. 매체가 번잡 상태이면, 단말은 현재의 전송이 끝날 때까지 백오프 카운터를 감소시키지 않는다. 백오프 카운터가 0이 되면 단말은 패킷을 전송한다. 전송 중에 충돌이 발생하면 경쟁 윈도우를 두 배로 하고, 성공적으로 전송하면 경쟁 윈도우를 최소 경쟁 윈도우로 설정한다. 경쟁 윈도우를 두 배로 증가시키는 것은 현재 채널의 상태가 높은 경쟁 수준(Contention Level)이라고 인식하기 때문이다. 경쟁 윈도우를 증가시키는 것은 다른 단말과 동시 전송 확률을 낮추는 역할을 한다. 따라서, 충돌과 재전송 시간을 줄인다. 단말이 성공적으로 패킷을 전송하였을 때에는 현재 경쟁 수준이 낮아졌다고 인식한다. 따라서 자신의 경쟁 윈도우를 최소 값으로 설정한다. 그러나 성공적인 전송이 낮아진 경쟁 수준을 의미하지는 않는다. 단말 수가 증가하면 높은 충돌로 인해 IEEE 802.11 DCF의 효율은 급격히 감소하고 지연 및 지터는 증가하게 된다.

IEEE 802.11 DCF의 성능을 향상시키기 위해서는 효율적인 충돌 해결 알고리즘이 필요하다. 이를 위해 많은 충돌 해결 알고리즘이 제안되었다. 예로, Kwon은 FCR (Fast Collision Resolution) 방법을 제안하였다<sup>[2]</sup>. FCR에서는 단말이 번잡 기간을 검출하면 경쟁 윈도우를 지수적으로 증가시키고 새로운 백오프 카운터를 생성한다. 그리고 연속적인 유휴 슬롯을 검출하면 백오프 카운터를 지수적으로 빠르게 감소시킨다. [3-7]은 경쟁 윈도우의 증감 인수를 조절하는 여러 가지 향상된 지수 백오프 방법을 제안하였다. 그리고 Cali는 지수 백오프 방법대신에 적응적 백오프 방법을 제안하였다<sup>[8, 9]</sup>. 적응적 백오프 방법은 각 단말이 현재 채널의 상태를 살펴보고 경쟁 수준을 측정하여 독립적으로 실행된다. 단말은 측정된 정보를 분산 알고리즘에 적용하여 전송 확률을 계산한다. 올바르게 계산된 전송 확률은 IEEE 802.11 DCF의 성능을 최적화시킨다.

충돌을 해결하기 위해 많은 알고리즘이 제안되었으

나 아직도 문제점들이 존재한다. [2-7]에서 제안된 방법들 또한 경쟁 수준이 높을 때는 급격한 성능 감소를 보인다. [8, 9]에서 제안된 방법은 IEEE 802.11 DCF에서 사용되는 경쟁 윈도우와 이진 지수 백오프 방법을 사용하지 않는다. 또한 기존 연구들은 높은 효율과 낮은 지연을 갖는 알고리즘에만 초점을 맞춰왔다. 이 두 가지가 좋은 백오프 알고리즘 판별의 기본적인 척도이지만 멀티미디어 응용을 지원하기 위해서는 지터 영향도 고려되어야 한다<sup>[10, 11]</sup>.

본 논문에서는, IEEE 802.11 DCF에서 사용하는 경쟁 윈도우와 이진 지수 백오프 방법을 사용하면서 높은 효율과 낮은 지연 및 지터를 갖는 분산 경쟁 기반의 DCF/VG (Distributed Coordination Function with Virtual Group) 방법을 제안한다. DCF/VG에서, 각 단말은 [8, 9]에서 제안된 적응적 백오프 방법처럼 캐리어 검출 방법을 이용하여 평균 유휴 기간과 번잡 기간을 측정한다. 측정된 정보를 이용하여, 단말은 가상 그룹 주기(Virtual Group Cycle)를 독립적으로 결정한다. 가상 그룹 주기는 하나 이상의 가상 그룹들로 구성되며 각 가상 그룹은 한번의 유휴 기간과 한번의 번잡 기간을 갖는다. 단말은 가상 그룹 주기에서 하나의 가상 그룹에서만 동작하고 다른 그룹에서는 동작하지 않는다. 즉, 자신의 가상 그룹에서는 IEEE 802.11 DCF처럼 유휴 슬롯이 검출되면 백오프 카운터를 감소시키고 번잡 슬롯이 검출되면 감소시키지 않는다. 그리고 백오프 카운터가 0이되면 패킷을 전송한다. 그러나 다른 가상 그룹에서는 유휴 슬롯이 검출되더라도 백오프 카운터를 감소시키지 않는다.

본 논문에서, 히든터미널 문제(Hidden Terminal Problem)는 고려하지 않는다. 따라서 IEEE 802.11 DCF의 기본적인 접근 방법인 CSMA/CA의 성능 향상에만 초점을 맞춘다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 제안하는 DCF/VG 방법에 대해 상세히 기술하고 III장에서는 제안한 방법의 효율을 수학적으로 분석한다. IV장에서는 수학적 분석 및 시뮬레이션 결과를 IEEE 802.11 DCF 방법과 비교 분석한다. 마지막으로, V장에서 결론을 맺는다.

## II. DCF/VG 방법

IEEE 802.11 DCF 프로토콜은 무선 매체를 공유하기

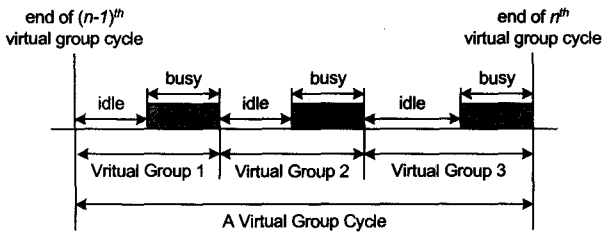


그림 1. 가상 그룹 주기  
Fig. 1. Virtual Group Cycle.

위해 경쟁 기반의 분산 채널 접근 방법을 제공한다. 그러나 이 방법은 단말 수가 증가함에 따라 많은 충돌을 야기한다. 따라서, IEEE 802.11 DCF의 효율, 지연, 지터 등의 성능은 급격하게 감소한다. 그러므로, IEEE 802.11 DCF 시스템의 성능을 향상시키기 위해서 간단하고 효율적인 DCF/VG 방법을 제안한다.

제안하는 방법의 기본적인 개념은 단말이 채널을 관찰하여 슬롯 비(Slot Ratio)를 측정하고 경쟁 수준을 예측하는 것에 근거를 두고 있다. 슬롯 비는 충돌 슬롯 수와 유향 슬롯 수의 비이다.

슬롯비는 단말이  $v$ 개의 가상 그룹을 갖는 가상 그룹 주기를 결정하기 위해 사용된다 ( $v \geq 1$ ). 하나의 가상 그룹은 두 개의 인수로 구성된다. 즉, 유향 기간과 번잡 기간이다 (그림 1 참조). 유향 기간은 연속적인 빈 슬롯 수이고 번잡 기간은 충돌이나 성공적인 전송으로 인해 채널이 사용 중일 때의 슬롯 수이다. 가상 그룹 주기를 결정한 후에, 각 단말은 가상 그룹 주기에 따라 동작한다. 단말은 여러 개의 가상 그룹 중에서 자신이 선택한 가상 그룹에서만 동작하고 다른 가상 그룹에서는 동작하지 않는다. 즉, 자신의 가상 그룹에서는 IEEE 802.11 DCF처럼 채널 상태가 유향이면 매 슬롯마다 백오프 카운터를 하나씩 감소하고 채널이 번잡 상태이면 백오프 카운터를 감소시키지 않는다. 그리고 백오프 카운터가 0이 되면 데이터 패킷을 전송한다. 그러나 다른 가상 그룹에서는 채널이 유향 상태라도 백오프 카운터를 감소시키지 않는다. 단말이 가상 그룹 주기 1을 가지면 ( $v=1$ ) 매 유향 기간 동안 백오프 카운터를 감소시키고 백오프 카운터가 0이 되면 패킷을 전송하기 때문에 그 단말은 IEEE 802.11 DCF와 똑같이 동작한다.

그림 2는 4개의 단말을 갖는 DCF/VG 방법의 동작 예를 보여준다. 모든 단말은 가상 그룹 주기가 2이고 단말 1과 2는 가상 그룹 1에서 단말 3과 4는 가상 그룹 2에서 동작한다. 그리고 이전 가상 그룹 주기가 완료되었을 때 단말 1, 2, 3, 4는 각각 6, 9, 7, 5의 백오프 카운

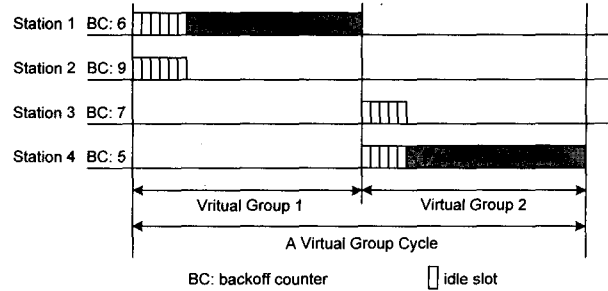


그림 2. DCF/VG 방법의 동작 예  
Fig. 2. Example of the DCF/VG.

터를 갖는다. 가상 그룹 1에서 단말 1과 2는 자신의 백오프 카운터를 감소시킨다. 여섯 개의 유향 슬롯 후에 단말 1의 백오프 카운터가 0이되어 데이터 패킷을 전송한다. 가상 그룹 1동안에는 단말 3과 4는 백오프 카운터를 감소시키지 않는다. 가상 그룹 2에서는 단말 3과 4는 백오프 카운터를 감소시키고 단말 1과 2는 감소시키지 않는다. 다섯 개의 유향 슬롯 후에 단말 4의 백오프 카운터가 0이 되어 데이터 패킷을 전송한다. 다음 가상 그룹 주기에서도 모든 단말은 이와 같이 자신의 가상 그룹에서만 동작한다.

DCF/VG 방법에서 가상 그룹 주기를 결정하기 위해 사용되는 정보는 슬롯 비(Slot Ratio)이다. 슬롯 비는 현재 채널의 경쟁 수준을 간단하고 효율적으로 측정하기 위해 사용된다. 슬롯 비  $SR$  는 다음과 같이 정의된다.

$$SR = \frac{Coll Slots}{Idle Slots} \quad (1)$$

단,  $Coll Slots$ 은 충돌로 인해 채널이 번잡 상태일 때의 슬롯 수이며,  $Idle Slots$ 은 연속적인 빈 슬롯 수이다.

슬롯 비의 측정은 캐리어 검출 방법이 모든 단말에 기본적으로 구현되어 있기 때문에 추가적인 오버헤드나 비용 없이 간단하게 가능하다.

슬롯 비의 측정과 가상 그룹 주기는 각 단말에서 유지되고 갱신되어야 한다. DCF/VG 방법은 각 가상 그룹 주기마다  $Coll Slots$ 과  $Idle Slots$ 의 채널 상태를 갱신한다. 단말의 갱신 과정을 명확하게 하기 위해 그림 1을 참조한다. 각 단말은 캐리어 검출 방법으로 채널 상태를 관찰하여  $n$ 번째 가상 그룹 주기 동안의 유향 슬롯 수  $idle_n$ 와 충돌 슬롯 수  $coll_n$ 를 측정한다. 측정된 값과 이동 평균 윈도우 (Moving Average Window)를 이용하여  $n$ 번째 가상 그룹 주기 후의 평균 유향 슬롯 수  $E[Idle Slots]_n$ 와 평균 충돌 슬롯 수  $E[Coll Slots]_n$ 를 다음과 같이 계산한다.

$$\begin{aligned}
& E[Idle Slots]_n \\
&= \alpha \cdot E[Idle Slots]_{n-1} + (1 - \alpha) \cdot idle_n, \\
& E[Coll Slots]_n \\
&= \alpha \cdot E[Coll Slots]_{n-1} + (1 - \alpha) \cdot coll_n, \quad (2)
\end{aligned}$$

$\alpha$ 는 평활 인수(Smoothing Factor)이다.

모든 단말은 처음 시작할 때 가상 그룹 주기 1을 갖는다 ( $v=1$ ). 단말은 성공적인 패킷 전송 후에 측정된 슬롯 비와 최적 슬롯 비를 이용하여 다음 절차에 따라 자신의 가상 그룹 주기를 갱신하고 단말이 동작할 가상 그룹을 선택한다. 최적 슬롯 비  $SR_{opt}$ 는 IEEE 802.11 DCF의 가장 좋은 효율을 얻기 위해 사용되는 값이다. 이전 연구에서 유휴 기간 동안 낭비된 시간과 충돌로 인해 낭비된 시간이 같을 때 네트워크는 가장 좋은 효율을 갖는다는 것을 밝혀냈다 ( $SR_{opt} = 1$ )<sup>[8, 9, 12]</sup>.

시간  $t$ 에 단말이 가상 그룹 주기  $v$ ,  $E[Idle Slots]_t$ ,  $E[Coll Slots]_t$  그리고  $SR_t$ 을 갖고 있을 때, 가상 그룹 주기를 1 증가시키면, 새로운 평균 유휴 슬롯 수  $E[Idle Slots]_{t-new}$ 와 평균 충돌 슬롯 수  $E[Coll Slots]_{t-new}$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
E[Idle Slots]_{t-new} &= \frac{v+1}{v} E[Idle Slots]_t, \\
E[Coll Slots]_{t-new} &= \frac{v}{v+1} E[Coll Slots]_t. \quad (3)
\end{aligned}$$

식 (3)을 이용하여, 새로운 슬롯 비  $SR_{t-new}$ 는 다음처럼 계산된다.

$$\begin{aligned}
SR_{t-new} &= \frac{E[Coll Slots]_{t-new}}{E[Idle Slots]_{t-new}} \\
&= \left( \frac{v}{v+1} \right)^2 \frac{E[Coll Slots]_t}{E[Idle Slots]_t} = \left( \frac{v}{v+1} \right)^2 SR_t. \quad (4)
\end{aligned}$$

따라서, 아래 식 (5) 조건이 만족되고 현재의 슬롯 비가 최적 슬롯 비보다 크면( $SR_t > SR_{opt}$ ) 단말은 가상 그룹 주기를 1 증가시킨다.

$$|SR_t - SR_{opt}| > |SR_{t-new} - SR_{opt}| \quad (5)$$

$||$ 는 절대값을 의미한다. 식 (5)는 측정된 슬롯 비와 최적 슬롯 비가 같을 때( $SR_t = SR_{opt}$ ) DCF/VG는 가장 좋은 효율을 갖기 때문에 사용된다.

반대로, 단말이 가상 그룹 주기를 1 감소시키면, 새로

운 슬롯 비는 다음과 같다.

$$SR_{t-new} = \left( \frac{v}{v-1} \right)^2 SR_t. \quad (6)$$

식 (6)에서 계산된  $SR_{t-new}$ 을 사용하여 식 (5)의 조건을 검사한다. 조건을 만족시키고 현재 슬롯 비가 최적 슬롯 비보다 작으면( $SR_t < SR_{opt}$ ) 단말은 가상 그룹 주기를 1 감소시킨다.

단말은 각 가상 그룹의 슬롯 비도 유지 관리한다. 성공적인 전송 후에 새로운 패킷에 대해 전송을 시도할 때 가장 작은 슬롯 비를 갖는 가상 그룹을 선택한다. 이는 가상 그룹간의 경쟁 수준을 균등하게 하기 위해서 사용된다.

모든 단말은 가상 그룹 주기와 각 단말이 동작할 가상 그룹을 독립적으로 결정하기 때문에 모든 단말이 선택하지 않은 가상 그룹이 존재할 수 있다. 이런 경우에는 연속적인 유휴 슬롯만 있을 뿐 번잡 기간이 없기 때문에 다음 가상 그룹이 시작할 수 없어 모든 단말은 패킷을 전송할 수 없게 된다. 이를 피하기 위해 각 단말은 성공적인 패킷 전송당 평균 충돌수  $C$ 를 유지하고 연속적인 유휴 슬롯 수가  $2^C CW_{min}$  이상이면 현재 가상 그룹은 끝난 것으로 간주하고 다음 그룹으로 넘어간다. 이는 올림함수이고  $CW_{min}$ 은 최소 경쟁 윈도우이다.

### III. 성능 분석

본 장에서는 Bianchi가 제안한 마코프 체인 모델을 변경하여 제안된 DCF/VG 방법의 효율을 수학적으로 분석한다. Bianchi는 IEEE 802.11 DCF의 백오프 방법을 위한 이차원 마코프 체인 모델을 제안하고 마코프 체인 모델의 정상 상태(Steady State) 확률을 유도하여 정확한 효율을 분석하였다<sup>[13]</sup>. 본 논문에서는 Bianchi가 효율 분석 시 사용한 가정을 사용한다. 현재 경쟁하는 단말 수는  $n$ 이며 각 단말은 항상 전송할 데이터 패킷을 가지고 있다. 각 패킷은 전송되기 전에 백오프 카운터가 0이 될 때까지 랜덤 백오프 시간 동안 대기해야 한다.

슬롯 시간  $t$ 에  $b(t)$ 는 백오프 카운터를 나타내는 확률 과정(Stochastic Process)이고  $s(t)$ 는 백오프 단계(Stage)를 나타내는 확률 과정이라고 하자. 백오프 카운터는  $[0, W_i - 1]$  사이에서 균등하게 선택된다.  $W_i$ 는

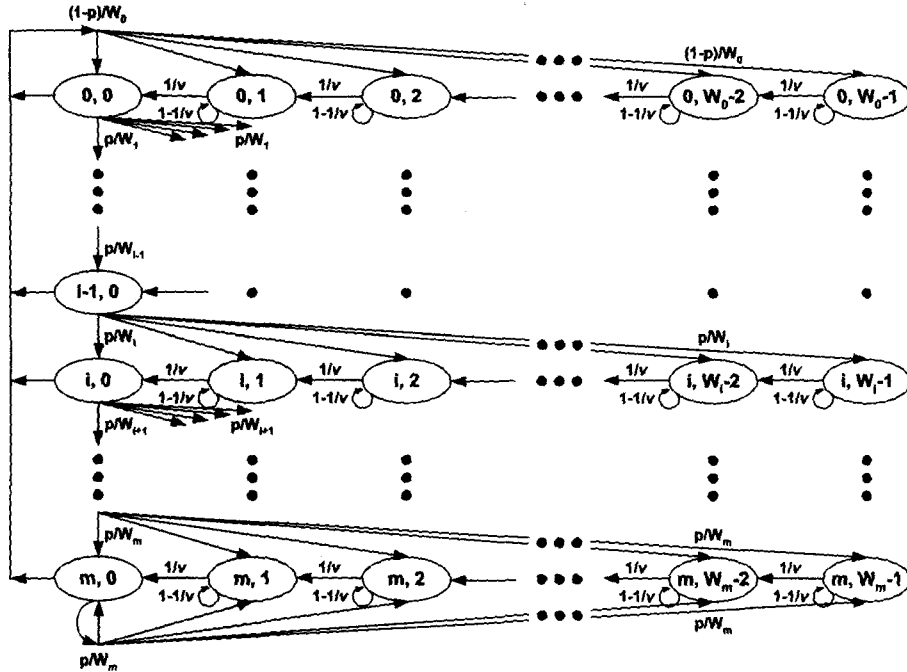


그림 3. DCF/VG 방법의 마코프 체인 모델  
 Fig. 3. Markov chain model for the DCF/VG scheme.

현재의 경쟁 윈도우 크기가  $i$ 는 백오프 단계이다.  $CW_{min}(W)$ 가 최소 경쟁 윈도우 크기일 때  $W_i = 2^i \cdot CW_{min}$ 와 같은 관계를 갖는다.

$0 \leq i \leq m$ .  $m$ 은  $CW_{max} = 2^m \cdot CW_{min}$  관계를 만족시키는 최대 백오프 단계이다.

각 단말의 백오프 카운터의 값은 재전송 횟수에 따라 다른 값을 갖고 가상 그룹 주기  $v$ 에 따라 다르게 감소하기 때문에  $b(t)$ 는 마코비안(Markovian)이 아니다. 그러므로 재전송 횟수와 상관없이 매 패킷 전송 시마다 상수이고 독립적인 확률  $p$ 로 충돌이 발생한다고 가정한다.  $p$ 는 패킷 충돌 확률이다. 또한 가상 그룹 주기도 상수이고 독립적이라고 가정한다. 따라서,  $\{s(t), b(t)\}$ 는 이산시간 마코프 체인 모델이다. 단말의 상태를  $\{i, k\}$ 로 나타낼 때 이 모델을 그림 3에 도시하였다. 단,  $i$ 는 백오프 단계이고  $k$ 는 백오프 카운터이다.

DCF/VG의 마코프 체인 모델의 상태 천이 확률은 다음과 같다.

i) 다른 가상 그룹에서는 백오프 카운터를 감소시키지 않는다.

$$P\{i, k | i, k\} = 1 - \frac{1}{v},$$

$$1 \leq k \leq W_i - 1, 0 \leq i \leq m$$

ii) 단말의 가상 그룹에서는 백오프 카운터를 감소시킨다.

$$P\{i, k | i, k + 1\} = \frac{1}{v},$$

$$0 \leq k \leq W_i - 2, 0 \leq i \leq m$$

iii) 단계에서 전송 실패하면 다음 단계에서 새로운 백오프 카운터를 선택한다.

$$P\{i, k | i - 1, 0\} = \frac{p}{W_i},$$

$$0 \leq k \leq W_i - 1, 1 \leq i \leq m$$

iv) 최대 백오프 단계에 도달한 후에 전송 실패하면 최대 백오프 단계에 그대로 머무른다.

$$P\{m, k | m, 0\} = \frac{p}{W_m}, 0 \leq k \leq W_m - 1$$

v) 단계에서 전송 성공 후에 단말은 단계 0의 새로운 백오프 카운터를 선택한다.

$$P\{0, k | i, 0\} = \frac{1-p}{W_0},$$

$$0 \leq k \leq W_0 - 1, 0 \leq i \leq m.$$

$b_{i,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t) = i, b(t) = k\}$ 는 이 마코프

체인 모델의 정상 분포(Stationary Distribution)라고 하자 ( $0 \leq i \leq m, 0 \leq k \leq W_i - 1$ ). 그러면 정상 상태 분포는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$b_{i,0} = p^i \cdot b_{0,0}, \quad 0 \leq i \leq m-1, \quad k=0 \quad (7)$$

$$b_{m,0} = \frac{p^m}{1-p} \cdot b_{0,0}, \quad i=m, \quad k=0 \quad (8)$$

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} \cdot v \cdot b_{i,0}, \quad (9)$$

$$0 \leq i \leq m, \quad 0 < k \leq W_i - 1$$

마코프 체인 모델의 일반적인 특징과 식 (7)-(9)를 이용하여 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$b_{i,k} = \begin{cases} b_{i,0}, & \text{if } k=0 \\ \frac{W_i - k}{W_i} v \cdot b_{i,0}, & \text{else } 0 < k \leq W_i - 1 \end{cases} \quad (10)$$

$$0 \leq i \leq m$$

정상 분포의 일반적인 조건을 이용하여 다음과 같은 관계를 유도한다.

$$1 = \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{W_i-1} b_{i,k} = \sum_{i=0}^m b_{i,0} + \sum_{i=0}^m b_{i,0} \sum_{k=1}^{W_i-1} \frac{W_i - k}{W_i} v$$

$$= \sum_{i=0}^m b_{i,0} + \sum_{i=0}^m b_{i,0} \frac{W_i - 1}{2} v$$

$$= b_{0,0} \frac{2(1-2p) + v[(1-2p)(W-1) + pW(1-(2p)^m)]}{2(1-2p)(1-p)} \quad (11)$$

식 (11)을  $b_{0,0}$ 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$b_{0,0} = \frac{2(1-2p)(1-p)}{2(1-2p) + v[(1-2p)(W-1) + pW(1-(2p)^m)]} \quad (12)$$

단말은 백오프 카운터가 0이 될 때 데이터 패킷을 전송하므로 임의로 선택된 슬롯 시간에 데이터 패킷을 전송할 확률  $\tau$ 는 다음과 같다.

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{i,0} = \sum_{i=0}^{m-1} b_{i,0} + b_{m,0} = \frac{b_{0,0}}{1-p}$$

$$= \frac{2(1-2p)}{2(1-2p) + v[(1-2p)(W-1) + pW(1-(2p)^2)]} \quad (13)$$

식 (13)으로부터, 전송 확률  $\tau$ 는 충돌 확률  $p$ 와 가상

그룹 주기  $v$ 와 관련되어 있음을 알 수 있다.  $p$ 는 같은 슬롯 시간에  $n-1$ 개의 다른 단말들 중에 하나 이상의 단말이 전송할 확률이다. 모든 단말이 확률  $\tau$ 로 전송한다면 충돌 확률  $p$ 는 다음과 같다.

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (14)$$

가상 그룹 주기  $v$ 는 하나의 패킷을 성공적으로 전송하기 위해 낭비된 총 충돌 시간  $T_{coll}$ 과 총 유휴 시간  $T_{idle}$ 의 비를 최적 슬롯 비와 거의 같게 해주는 정수 값이다 ( $SR \approx SR_{opt}$ ). 즉,  $v$ 는 다음 식 (15)를 만족시키는 값이다.

$$SR = \frac{T_{coll}}{T_{idle}} \approx SR_{opt} = 1 \quad (15)$$

$T_{coll}$ 과  $T_{idle}$ 은  $P_{tr}$ 와  $P_s$ 을 이용하여 계산할 수 있다.  $P_{tr}$ 은 슬롯 시간에 하나 이상의 단말이 전송할 확률이고  $P_s$ 는 한 단말만이 전송하여 성공할 확률이다.

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^n \quad (16)$$

$$P_s = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{P_{tr}} = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{1 - (1-\tau)^n} \quad (17)$$

성공적인 전송당 평균 유휴 슬롯 수는  $(1 - P_{tr}) / (P_{tr} P_s)$ 이다. 그러므로 총 유휴 시간  $T_{idle}$ 은 다음과 같다.

$$T_{idle} = \frac{1 - P_{tr}}{P_{tr} P_s} \sigma \quad (18)$$

$\sigma$ 는 한 슬롯의 시간이다. 성공적인 전송당 평균 충돌 수는  $1/P_s - 1$ 이다. 그러므로 총 충돌 시간  $T_{coll}$ 은 다음과 같다.

$$T_{coll} = T_c \left( \frac{1}{P_s} - 1 \right) \quad (19)$$

$T_c$ 와  $T_s$ [이 값은 식 (21)에서 사용됨.]는 충돌과 성공적인 전송으로 인해 채널이 번잡 상태일 때의 평균 시간이다. 패킷 헤더를  $H(= PHY_{hdr} + MAC_{hdr})$ , 전송 지연(Propagation Delay)을  $\delta$ , SIFS 시간을  $SIFS$ , DIFS 시간을  $DIFS$ , ACK 전송 시간을  $ACK$  그리고 데이터 패킷 크기를  $L$ 이라 하자. 그러면  $T_c$ 와  $T_s$ 는 다음과 같이 표현된다.

표 1. 수학적 및 시뮬레이션 파라미터  
Table 1. Numerical and Simulation Parameters.

파라미터	값
Channel Bit Rate	1 Mbps
Slot Time	20 $\mu$ s
SIFS	10 $\mu$ s
DIFS	50 $\mu$ s
Propagation Delay	1 $\mu$ s
MAC Header	224 bits
PHY Header	192 bits
ACK Packet	112 bits + PHY Header
CWmin	32
CWmax	1024
ACK Timeout	314 $\mu$ s

$$T_c = H + L + DIFS + \delta,$$

$$T_s = H + L + SIFS + \delta + ACK + DIFS + \delta \quad (20)$$

식 (18)과 (19)를 식 (15)에 대입하여 전송 확률  $\tau$ 를 계산한 후에 이 값을 다시 식 (14)에 대입하여 충돌 확률  $p$ 를 계산한다. 계산된  $\tau$ 와  $p$ 를 식 (13)에 대입하여 가상 그룹 주기  $v$ 를 계산한다. 계산된  $v$ 는 실수 값을 갖는다. 실제로  $v$ 는 정수만을 취하므로 계산된  $v$ 를 반올림하여 정확한 가상 그룹 주기를 계산한다.

$v$ 를 반올림하여 새로운 값을 취했기 때문에, 위에서 계산된  $\tau$ 와  $p$ 도 다시 계산되어야 한다. 식 (13)과 (14)는 알지 못하는 값  $\tau$ 와  $p$ 를 갖는 비선형(Nonlinear) 시스템이다. 이 비선형 시스템은 수학적 방법을 이용하여 해결될 수 있으며 유일한 해를 갖는다.

효율(Normalized Throughput)  $S$ 는 성공적으로 패킷을 전송하기 위해 사용된 채널의 시간 비로 나타낼 수 있으며 다음과 같이 표현된다.

$$S = \frac{P_s P_{tr} L}{(1 - P_{tr})\sigma + P_{tr} P_s T_s + P_{tr} (1 - P_s) T_c} \quad (21)$$

#### IV. 수학적 분석 및 시뮬레이션 결과

본 장에서는 제안된 DCF/VG 방법의 수학적 분석 및 시뮬레이션 결과를 제시한다. 제안된 방법의 성능을 검증하기 위해서 IEEE 802.11 DCF 방법의 결과와 비교 분석한다. 표 1은 수학적 분석 및 시뮬레이션에서 사용된 IEEE 802.11 DCF의 시스템 파라미터이다. 평활 인수는 0.9를 사용하였다.

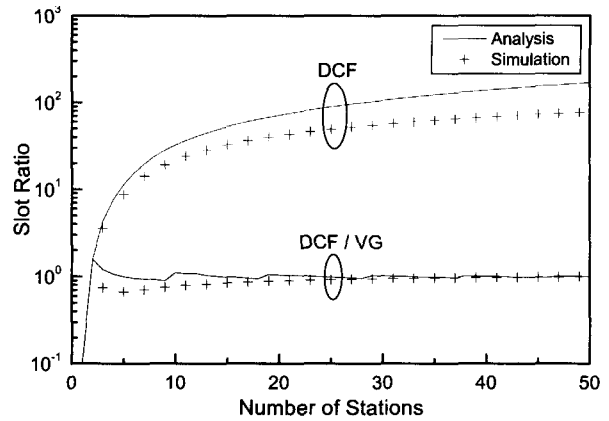


그림 4. 슬롯 비  
Fig. 4. Slot Ratio.

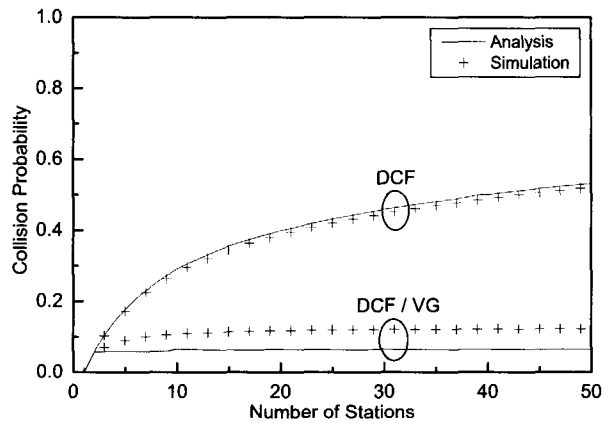


그림 5. 충돌 확률  
Fig. 5. Collision Probability.

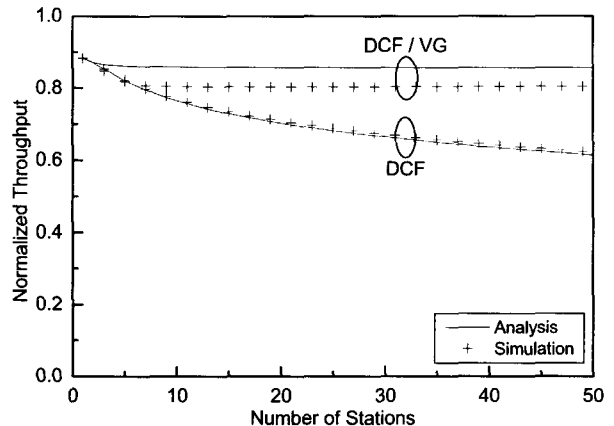


그림 6. 효율  
Fig. 6. Normalized Throughput.

그림 4-6은 단말 수에 따른 수학적 분석 및 시뮬레이션 결과를 같이 보여준다. 그림 7과 8은 시뮬레이션 결과이다. 데이터 패킷 크기는 8184비트를 사용하였다.

그림 4는 DCF와 DCF/VG 방법의 슬롯 비를 나타낸다. DCF/VG 방법의 슬롯 비는 단말 수에 상관없이 최

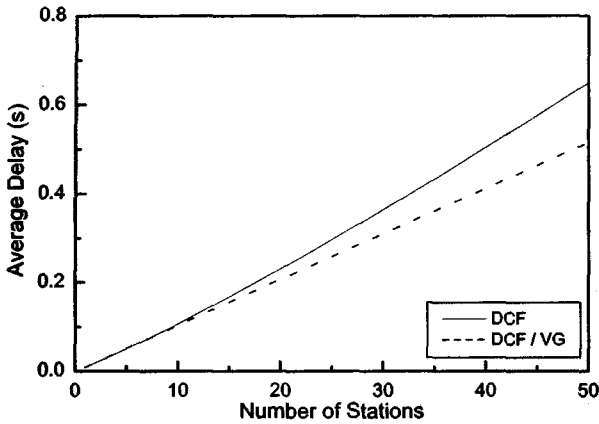


그림 7. 평균 지연  
Fig. 7. Average Delay.

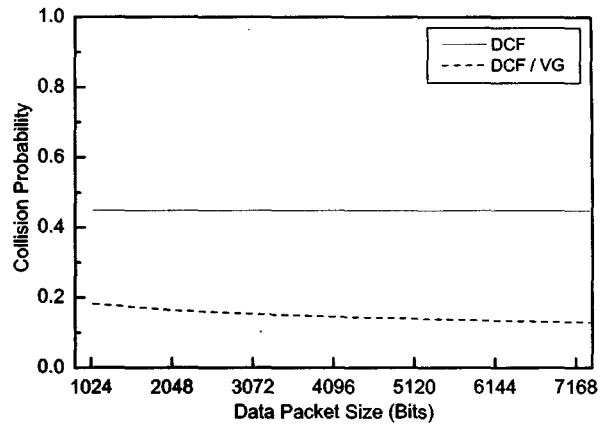


그림 9. 충돌 확률  
Fig. 9. Collision Probability.

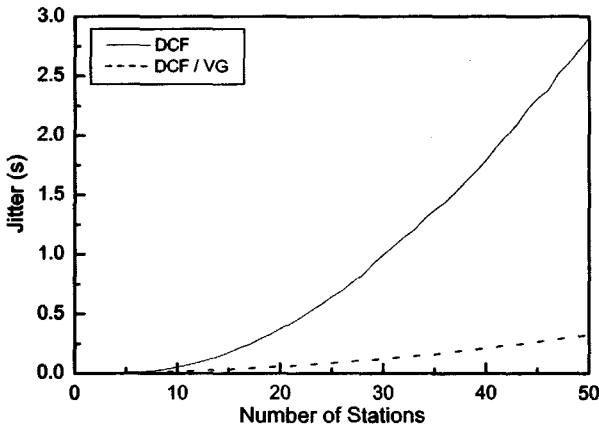


그림 8. 지터  
Fig. 8. Jitter.

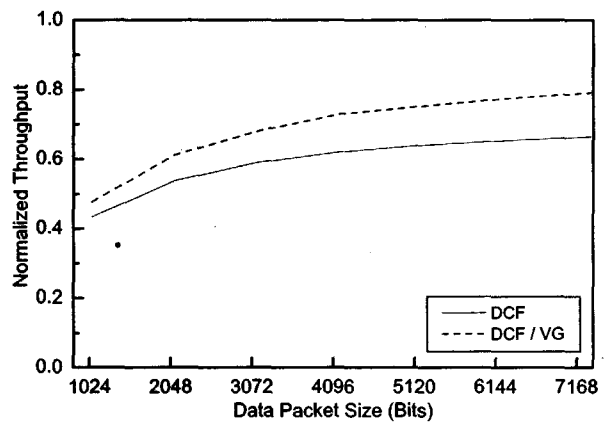


그림 10. 효율  
Fig. 10. Normalized Throughput.

적 슬롯 비와 거의 일치한다. 그러나 DCF의 슬롯 비는 단말 수가 증가함에 따라 급격하게 증가한다. 단말 수가 적을 때는 DCF/VG의 슬롯 비와 최적 슬롯 비간 약간의 오차를 보인다. 그리고 슬롯 비가 조금 감소한 후에 다시 증가함을 알 수 있다. 이는 가상 그룹 주기의 증감이 슬롯 비에 큰 영향을 미치기 때문이다. 그러나 단말 수가 많을 때는 가상 그룹 주기의 증감이 슬롯 비에 큰 영향을 주지 않기 때문에 최적 슬롯 비와 거의 일치함을 알 수 있다.

그림 5와 6은 단말 수가 충돌 확률과 효율에 미치는 영향을 보여준다. DCF는 단말 수가 증가함에 따라 충돌 확률이 급격하게 증가하기 때문에 매우 좋지 않은 효율을 갖는다. 그러나 제안하는 방법은 단말 수에 상관없이 낮은 충돌 확률과 높은 효율을 갖는다. 이는 경쟁 수준에 따라 최적 슬롯 비와 유사한 슬롯 비를 유지하기 위해서 캐리어 검출 방법에 의해 제공된 정보를 이용하여 가상 그룹 주기를 동적으로 변경하기 때문이다. 그림 5와 6에서 DCF의 수학적 분석 결과는 시뮬레

이션 결과와 거의 일치하지만 DCF/VG는 약간의 오차를 보인다. 시뮬레이션에서, 각 단말이 독립적으로 가상 그룹 주기를 결정하여 모든 단말이 항상 같은 가상 그룹 주기를 갖지 않기 때문에 일부 가상 그룹이 다른 가상 그룹에 비해 높은 경쟁 수준을 갖기 때문이다. 수학적 분석에서는 모든 단말이 같은 가상 그룹 주기를 갖고 모든 가상 그룹은 같은 경쟁 수준을 갖는다. 따라서 시뮬레이션에서의 충돌 확률이 증가하게 되고 효율은 낮아지게 된다.

그림 7과 8은 평균 지연과 지터를 나타낸다. 지연은 큐의 맨 앞에 패킷이 도착할 때의 시간부터 그 패킷이 성공적으로 전송될 때까지 걸린 시간이다. 지터는 지연의 분산을 의미한다. DCF는 높은 충돌 확률로 인해 그리고 DCF/VG는 가상 그룹 주기로 인해 평균 지연은 증가한다. 그러나 제안된 방법이 DCF보다 낮은 평균 지연을 가지며 차이도 점점 커진다. DCF의 지터는 DCF의 특징으로 인해 급격하게 증가한다. 전송 중에 충돌이 발생하면 단말은 경쟁 윈도우를 두 배로 하고



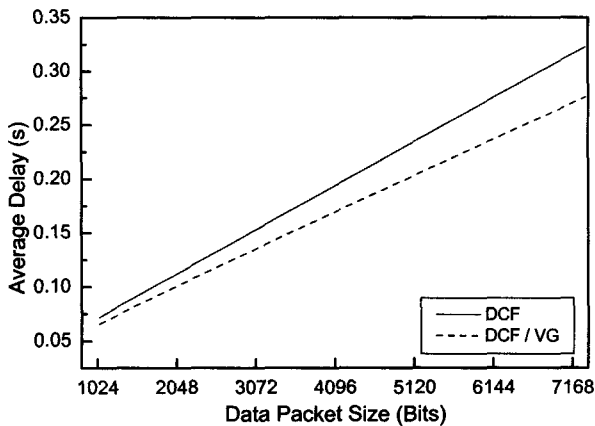


그림 11. 평균 지연  
Fig. 11. Average Delay.

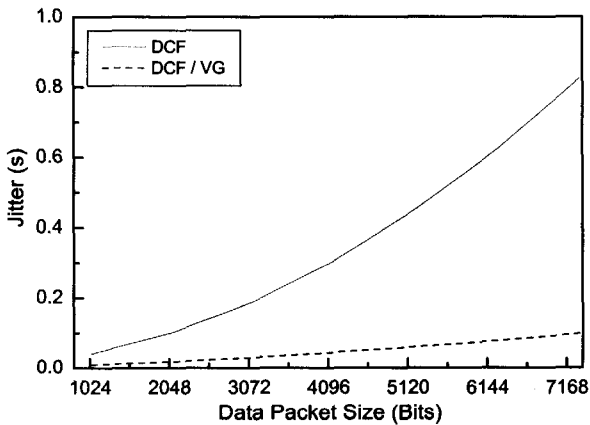


그림 12. 지터  
Fig. 12. Jitter.

성공적으로 전송하면 경쟁 윈도우를 최소 경쟁 윈도우로 설정한다. 따라서 성공적으로 전송한 단말은 충돌이 발생한 단말보다 더 작은 백오프 카운터를 갖게 되어 다음 전송 시에 더 빨리 전송할 가능성이 높다. 그러나 DCF/VG의 지터는 충돌 확률이 매우 낮기 때문에 매우 천천히 증가한다.

그림 9-12는 데이터 패킷 크기에 따른 시뮬레이션 결과를 보여준다. 단말 수는 30을 사용하였다. 그림 9와 10은 데이터 패킷 크기가 충돌 확률과 효율에 미치는 영향을 나타낸다. 충돌 확률은 경쟁 수준에 의해 영향을 받기 때문에 DCF의 충돌 확률은 데이터 패킷 크기에 상관없이 일정한 값을 갖는다. 그러나 DCF/VG는 약간 감소한다. 이는 DCF/VG에서 데이터 패킷 크기가 커지면 슬롯 비도 증가하게 되어 단말은 슬롯 비를 최적 슬롯 비에 맞추기 위해서 가상 그룹 주기를 증가시키기 때문이다. 효율은 데이터 패킷 크기가 커짐에 따라 증가함을 알 수 있다. 이는 작은 데이터 패킷에서의

효율은 MAC 헤더, PHY 헤더, DIFS, SIFS와 ACK와 같은 오버헤드에 의해서 큰 영향을 받기 때문이다.

그림 11과 12는 데이터 패킷 크기가 커지면 충돌 시 패킷의 큰 크기로 인해 평균 지연과 지터도 증가함을 보여준다. DCF의 지터는 급격하게 증가하나 제안하는 방법은 충돌 확률이 매우 낮기 때문에 천천히 증가함을 알 수 있다.

### V. 결론

본 논문에서, IEEE 802.11 DCF 시스템의 성능을 향상시키기 위해 간단하고 효율적인 DCF/VG 방법을 제안하였다. 제안된 방법의 기본 개념은 채널을 관찰하여 측정된 슬롯 비를 이용하여 경쟁 수준을 예측하는 것에 근거를 두고 있다. DCF/VG 단말은 경쟁 수준을 낮추기 위해 가상 그룹 주기를 독립적으로 결정하고 자신의 가상 그룹에서는 IEEE 802.11 DCF 방법과 똑같이 동작하기 때문에 호환이 가능하다. 가상 그룹 주기가  $v$ 인 DCF/VG는 채널의 경쟁 수준을  $1/v$ 로 줄인다. 따라서 제안된 방법은 시스템의 성능을 향상시킨다. 수학적 분석 및 시뮬레이션 결과, DCF/VG는 경쟁 수준 및 데이터 패킷 크기와는 상관없이 낮은 충돌 확률을 유지함으로써 높은 효율과 낮은 지연 및 지터를 가짐을 확인하였다.

### 참고 문헌

- [1] IEEE, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," IEEE Standard 802.11, June 1999.
- [2] Y. Kwon, Y. Fang, and H. Latchman, "A Novel MAC Protocol with Fast Collision Resolution for Wireless LANs," IEEE INFOCOM 2003, vol. 2, pp. 853-862, April 2003.
- [3] N. Song, B. Kwak, J. Song, and L. E. Miller, "Enhancement of IEEE 802.11 Distributed Coordination Function with Exponential Increase Exponential Decrease Backoff algorithm," IEEE VTC 2003, vol. 4, pp. 2775-2778, April 2003.
- [4] V. Vitsas, "Throughput Analysis of Linear Back-off Scheme in Wireless LANs," Electronics Letters, vol. 39, no. 1, pp. 99-100, January 2003
- [5] Q. Ni, I. Aad, C. Barakat, and T. Turetletti, "Modeling and Analysis of Slow CW Decrease for IEEE 802.11 WLAN," IEEE PIMRC 2003, vol. 2, pp. 1717-1721, September 2003.

- [6] Z. J. Haas, J. Deng, "On Optimizing the Backoff Interval for Random Access Schemes," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 51, pp. 2081-2090, December 2003.
- [7] H. Wu, S. Cheng, Y. Peng, K. Long, and J. Ma, "IEEE 802.11 Distributed Coordination Function (DCF): Analysis and Enhancement," *IEEE ICC 2002*, vol. 1, pp. 605-609, April 2002.
- [8] F. Cali, M. Conti, and E. Gregori, "IEEE 802.11 MAC Protocol: Design and Performance Evaluation of an Adaptive Backoff Mechanism," *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, vol. 18, no. 9, pp. 1774-1786, September 2000.
- [9] F. Cali, M. Conti, and E. Gregori, "Dynamic Tuning of the IEEE 802.11 Protocol to achieve a theoretical throughput limit," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 8, no. 6, pp. 785-799, December 2000.
- [10] P. Berthou, T. Gayraud, O. Alphand, C. Prudhommeaux, and M. Diaz, "A multimedia architecture for 802.11b networks," *IEEE WCNC 2003*, vol. 3, pp. 1742 - 1747, March 2003.
- [11] W. Pattara-Atikom, P. Krishnamurthy, and S. Banerjee, "Distributed mechanisms for quality of service in wireless LANs," *IEEE Wireless Communications*, vol. 10, pp. 26-34, June 2003.
- [12] R. G. Gallager, "A Perspective on Multiaccess Channels," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 31, pp. 124-142, March 1985.
- [13] G. Bianchi, "Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function," *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 535-547, March 2000.

---

 저 자 소 개
 

---



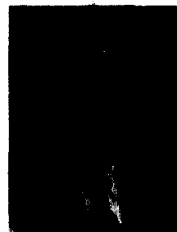
김 선 명(정회원)

2000년 아주대학교 정보및컴퓨터  
공학부 학사 졸업.

2002년 아주대학교 정보통신  
공학과 석사 졸업.

2002년~현재 아주대학교  
정보통신공학과 박사과정.

<주관심분야: 무선랜, Ad-Hoc, 센서 네트워크,  
MPLS>



조 영 종(정회원)

1983년 서울대학교 전자 공학과  
학사 졸업

1985년 한국과학기술원 전기및  
전자공학과 석사 졸업

1989년 한국과학기술원 전기및  
전자공학과 박사 졸업

1991년 금성정보통신연구소 책임연구원

1993년 미국 AT&T Bell Lab 교환 연구원

1996년~현재 아주대학교 정보및컴퓨터공학부  
부교수

<주관심분야: 광대역 통신, 유/무선 ATM, 큐잉시  
스템, 성능분석, 초고속 인터넷 장비 개발>