

---

# IEEE 802.11 무선랜 DCF의 정상 상태에서의 효과적인 성능 분석

이계상\*

Effective Performance Evaluation of IEEE 802.11 WLAN DCF Under Normal Conditions

Kye-Sang Lee\*

---

이 논문은 2006학년도 동의대학교 교내 연구비에 의해 연구되었음 (2006AA154)

---

## 요 약

IEEE 802.11 무선랜의 매체 접속 제어 프로토콜인 DCF의 정상 상태 성능을 분석한다. 그동안 포화 상태에서의 DCF 분석 연구는 많았지만 정상 상태에서의 효과적인 분석 방식 연구는 상대적으로 적었다. 본 논문은 정상 상태에서의 패킷 전송 시도율을, 포화 상태의 결과에 비례하는 것으로 근사하는 방법을 제시한다. 그 결과, 비교적 간단한 방정식의 반복 계산을 통해 수렴된 전송시도율과 패킷 충돌 확률을 얻을 수 있음을 보이고, 이 값들로부터 네트워크 처리율과 매체 접속 지연을 유도한다. 이 방식은 다른 마코프 체인 기반의 방식보다 훨씬 덜 복잡하며, 매우 정확한 결과를 예측할 수 있음을 수치결과를 통해 보인다.

## ABSTRACT

We analyze the performances of the DCF, which is the medium access control protocol of IEEE 802.11 WLAN, assuming normal traffic condition. There have been much less research efforts under the normal condition than those under the saturated one. This paper proposes an analytical method of approximating the transmission attempt rate under normal condition as proportional to that under saturated condition. In result, we show that we can obtain the transmission attempt rate and the packet collision probability which quickly converge using iterative computations of relatively simple equations, and using these results we derive the network throughput and medium access delay. Numerical results show that our method is much less complex than those based on the Markov Chain while it can predict the performances quite accurately.

## 키워드

무선랜, IEEE 802.11 MAC Access Control, DCF

## I. 서 론

IEEE 802.11 무선랜의 매체 접속 제어 프로토콜은

802.11e와 802.11n 표준으로 발전되어 가면서 계속 진화되고 있지만, 아직도 DCF (Distributed Coordination Function) 알고리즘[1]이 그 근간을 이루고 있다.

그동안 DCF의 성능에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다[2,3]. 잘 알려진 Bianchi[2]의 연구를 포함한 대부분의 연구는 포화 상태를 가정한 성능 분석 기법을 제안하였다. 포화 가정은 모든 노드가 항상 전송할 패킷을 가지고 있는 상태를 가정한다. 대표적인 포화상태를 가정한 연구인 [2]는 마코프 체인 모델링 분석 기법을 사용하였다. [3]은 마코프 체인 모델을 사용하여 802.11e 매체 접속 제어 알고리즘을 분석하였다.

최근에는 포화 상태가 아닌 실제 네트워크 상황을 반영하는 정상 상태에서의 분석 연구들이 보고되고 있다 [4,5,6]. 마코프 체인 방식과 큐잉 모델을 혼합한 분석 방식을 제안한 연구[4]는 분석 과정이 매우 복잡하다. 확장된 마코프 체인 모델을 사용한 연구[5] 역시 많은 수의 마코프 체인 상태 천이를 고려해야 하므로 복잡하며 수치 해석에도 많은 시간이 소요된다. [6]은 G/G/1 큐잉 모델을 적용하여 간단한 방정식 풀이를 사용하는 분석 모델을 제안하였으나 분석 결과가 부정확한 한계를 드러내었다.

본 논문은 정상 상태의 DCF 성능을 분석한다. 정상 상태에서의 패킷 전송 시도율을 포화 상태의 결과에서 일정 비율로 줄여 근사한다. 그 결과, 비교적 간단한 방정식의 반복 계산을 통해 쉽게 수립되는 전송시도율과 패킷 충돌 확률을 얻을 수 있다. 이 과정을 다음 II장에서 자세히 기술한다. III장에서는 전송 시도율과 충돌 확률로부터 네트워크 처리율과 매체 접속 지연을 유도한다. IV장에서 수치 해석 결과를 보이고 이를 모의실험 결과로 검증한 다음, V장의 결론으로 맺는다.

## II. 정상 상태 DCF 백오프 과정의 분석

이 장에서는 먼저 DCF의 백오프 과정을 살펴보고, 포화 상태에서의 백오프 과정을 분석한 뒤, 그 결과를 이용하여 근사한 정상 상태 분석 과정을 기술한다.

### 2.1 DCF 백오프 과정

전송할 패킷이 있는 각 노드는 다른 노드에 의한 채널 사용을 감지하면 채널 사용이 완료될 때까지 기다려야 하며 그 후 백오프 과정을 수행해야 한다.

백오프 과정은 채널 사용이 종료된 후 휴지 상태가 DIFS 시간 동안 지속 되면 백오프 카운터를 설정함으로써

시작된다. 이후, 각 노드는 매 타임 슬롯의 경계에서 해당 타임 슬롯이 휴지 상태였는지를 판단한다. 만약 해당 타임 슬롯이 휴지 상태였다면 노드는 자신의 백오프 카운터를 하나 줄인다. 해당 타임 슬롯이 휴지 상태가 아니라면 노드는 백오프 카운터를 동결시키고 채널 사용이 끝나기를 기다린다. 채널 사용이 끝난 후, 노드는 휴지 상태의 DIFS 시간 후 전에 사용하던 백오프 카운터를 사용하여 다시 슬롯 경계마다 줄여 나간다. 만약 백오프 카운터가 0이 되면 노드는 패킷을 전송할 수 있다.

전송된 패킷이 충돌하면 충돌이 종료된 후 새로운 백오프 스테이지에 들어간다. 동일한 백오프 과정이 진행되지만, 또 다른 충돌의 확률을 줄이기 위하여 백오프 스테이지의 평균 길이는 두 배로 늘어난다.  $m$ 개의 충돌 후 백오프 스테이지의 길이가 정해진 최대값에 도달되면 이후에는 더 이상 늘어나지 않는다. 또한, 충돌 횟수가 최대 허용값  $M$ 을 초과하면 전송을 포기하고 패킷을 폐기한다.

### 2.2 포화 상태에서의 백오프 과정 분석

그림 1은 포화 상태에 있는 한 노드에서의 백오프 진행 과정을 예시한다. 패킷 3의 경우 세 번의 충돌을 겪고 네 번째 시도가 성공하며 네 개의 백오프 스테이지 ( $B_0, B_1, B_2, B_3$ )를 거친다. 그림은 패킷 전송과 충돌에 소요된 시간은 표시하지 않고 백오프 과정만을 나타낸다. 이 과정은 나머지 다른 노드들의 백오프 과정과 상호 연관되어 있는 복잡한 과정이지만, [2,7]에서와 같이 상호 독립이라고 가정한다. 그러면, 한 패킷의 연속된 충돌들도 독립이 된다. 따라서, 이 노드의 전송시도가 다른 노드의 시도와 동시에 일어날 충돌 확률을  $C$ 라 할 때, 한 패킷에 대한 평균 전송 횟수  $A(C)$ 는

$$A(C) = 1 + C + C^2 + \dots + C^M$$

이 된다. 여기서,  $M$ 은 재전송 시도 횟수의 상한 값이다.

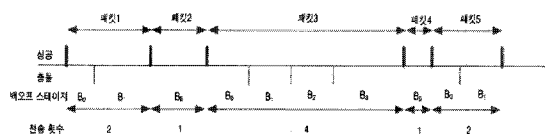


그림 1. 백오프 과정 예시  
Fig. 1 An example of backoff process

또한, 백오프에 소요된 총 슬롯 수의 평균  $B(C)$ 는

$$B(C) = b_0 + Cb_1 + C^2b_2 + \dots + C^M b_M$$

이 된다. 여기서,  $b_i$ 는  $i$ 번째 백오프 스테이지의 평균 길이로, 경쟁 윈도우의 최소 크기를  $\overline{CW_{\min}}$ 이라 할 때,

$$b_0 = \frac{\overline{CW_{\min}}}{2},$$

$$b_i = \begin{cases} 2^i b_0, & 1 \leq i \leq m-1 \\ 2^m b_0, & m \leq i \leq M \end{cases}$$

이다.  $m$ 은 경쟁 윈도우 최대 크기에 도달되는  $i$ 의 값이다. 즉,  $\overline{CW_{\max}} = 2^m \overline{CW_{\min}}$ 이다.

이렇게 구한  $A(C)$ 와  $B(C)$ 를 이용하여,  $r_s$ 를

$$r_s = \frac{A(C)}{B(C)} \quad (1)$$

라 정의할 때,  $r_s$ 는 포화 상태에서의 노드의 슬롯 당 전송 시도율이 되며, 위에 언급한 독립 가정에 의해 다른 노드의 전송 시도 횟수는  $r_s$ 와  $(n-1)$ 를 변수로 갖는 이항 분포를 갖게 된다.  $n$ 은 경쟁 상태에 있는 노드의 총수이다. 따라서, 주어진 한 노드가 전송 시도한다는 조건 하에, 다른 한 개 이상의 노드가 역시 동시에 전송을 시도함으로써 겪게 될 충돌 확률  $C$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$C = 1 - (1 - r_s)^{n-1}, \quad n \geq 2 \quad (2)$$

### 2.3 정상 상태에서의 백오프 과정 분석

이제 포화 상태가 아닌 정상 상태를 고려한다. 포화 상태와 달리 정상 상태의 경우는 노드에 전송할 패킷이 없는 경우가 존재한다. 우리는 이를 포화 상태 전송 시도율  $r_s$ 에서 일정 비율  $\alpha$ 로 줄여든 정상 상태 전송 시도율  $r$ 로 모델링한다. 즉,  $r = \alpha r_s$  (단,  $0 < \alpha < 1$ )으로 근사한다.

포화상태에서 평균 패킷 서비스 시간(즉, 패킷 전송이 성공하거나, 최대 시도 허용값에 도달되어 폐기될 때까지의 평균 시간)을  $S_s$ 라 할 때, 이 시간 동안 패킷이 도착되면 포화 상태가 계속되며, 도착되지 않으면 휴지 상태가 됨을 주목할 때, 패킷 서비스 시간  $S_s$  동안 하나 이

상의 패킷이 도착될 확률을  $\alpha$ 로 한다.  $\alpha$ 를 구하기 위해 다음에 먼저  $S_s$ 를 구한다.

$I_b$ 를 백오프 카운터가 1 감소하는데 소요되는 평균 시간이라 하자. 각 노드는 평균적으로 백오프 기간 중  $B(C)$ 개의 슬롯만큼 체류하므로,  $S_s$ 는

$$S_s = B(C)I_b$$

으로 구할 수 있다.

그런데, 여기서  $I_b$ 의 계산에는, 백오프 카운터가 채널이 휴지 상태인 경우 1 감소되는데 한 슬롯 타임  $\sigma$ 가 소요되며, 채널이 사용 (전송 성공 또는 충돌)중일 때는 그 사용 시간만큼 더 지연됨이 고려되어야 한다. 즉, 채널이 휴지상태인 경우, 그리고 채널이 사용되어 전송이 성공하는 경우와 사용되지만 충돌이 일어나는 모두 세 가지 경우를 조건부 확률로 나누어 생각하면,  $I_b$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$I_b = (1 - p_b)\sigma + p_i p_s (T_s \sigma + \sigma) + p_b (1 - p_s) (T_c \sigma + \sigma)$$

여기서, 슬롯이 사용 중일 확률  $p_b$ 와 사용 중이라는 조건하에 성공 확률  $p_s$ 는 각각

$$p_b = 1 - (1 - r)^n = 1 - (1 - C)^{n/(n-1)},$$

$$p_s = \frac{nr(1-r)^{n-1}}{p_b} = n \left(1 - \frac{C}{p_b}\right)$$

이다.  $T_s$ 와  $T_c$ 는 각각 전송이 성공했을 때와 실패했을 때의 평균 소요 시간 (단위, 슬롯)을 나타낸다.

이와 같이  $S_s$ 를 구했으므로, 다음은  $S_s$  동안 하나 이상의 패킷이 도착될 확률  $\alpha$ 를 구한다. 패킷 도착 과정이 도착률  $\lambda$ 인 포아송 과정을 따른다고 가정하면 확률  $\alpha$ 는  $\alpha = (1 - e^{-\lambda S_s})$ 이 된다. 따라서, 정상 상태에서의 전송 시도율  $r$ 은

$$r = (1 - e^{-\lambda S_s}) r_s \quad (3)$$

이 된다. 이상의 유도 과정을 종합하면, 결국 식 (3)의  $r$ 은 충돌 확률  $C$ 의 함수로 표현되었음을 주목하라.

한편, 정상 상태에서의 충돌 확률  $C$ 는 다시 식(2)의

$r_s$ 를  $r$ 로 치환하면 다음과 같이  $r$ 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$C = 1 - (1-r)^{n-1}, \quad n \geq 2 \quad (4)$$

이제, 우리는 식 (3)과 (4)를 이용한 반복 계산을 통해, 정상 상태에서의 충돌 확률  $C$ 와 전송 시도율  $r$ 을 구할 수 있다. 즉, 초기값  $C$ 를 임의로 정하여 식(3)으로  $r_s$ 를 구하고 이를 식(4)에 대입하여 새로운  $C$ 를 구하고, 이를 다시 식(3)에 대입하는 과정을 반복함으로써 수렴되는 값  $C$ 를 계산할 수 있다.

### III. 처리율 및 매체 접속 지연

#### 3.1 평균 처리율

백오프 카운터가 1 감소하는데 소요되는 평균 시간  $I_b$ 의 계산시에 채널이 휴지상태인 경우와 전송 성공인 경우 그리고 충돌인 경우가 모두 고려되었으므로, 네트워크의 평균 총 처리율은 전송 성공시 크기  $L$ 인 패킷 전송 시간을, 평균시간인  $I_b$ 로 나누면 된다. 즉, 네트워크의 평균 총 처리율을  $S$ 라 할 때,  $S$ 는

$$\begin{aligned} S &= \frac{p_s p_b}{I_b} \frac{8L}{R} \\ &= \frac{r(1-r)^{n-1}}{I_b} \frac{8L}{R} \end{aligned}$$

이다. 각 노드당 처리율은 총 처리율  $S$ 를 노드 수  $n$ 으로 나누면 된다. 여기서,  $L$ 은 패킷 크기(단위, 바이트)이며,  $R$ 은 채널의 전송 속도이다.

#### 3.2 매체 접속 지연

매체 접속 지연을 구하기 위해, 먼저  $i$ 개의 패킷 재전송 후 비로소 패킷 전송이 성공하는 경우의 평균 매체 접속 지연  $D_i$  ( $i=0,1,\dots,M-1$ )를 구한다. 여기서,  $i=0$ 는 재전송 없이 최초 전송이 성공한 경우이고,  $i=M-1$ 은  $(M-1)$ 개의 재전송 후 성공한 경우로 최초 전송을 포함하면 최대 시도 허용값  $M$ 번째에 성공한 경우를 의미한다.  $D_i$ 는  $i$ 개의 충돌에 소요된 시간과  $(i+1)$ 개의 백오프 스테이지 소요 시간의 합 (단위, 슬

롯)이므로,

$$D_i = \sum_{j=0}^i B_j + iT_c$$

이 된다.  $D_i$ 의 단위는 슬롯이다. 여기서  $B_j$ 는  $j$ 번째 백오프 스테이지의 평균 소요 시간이다. 그런데  $j$ 번째 백오프 스테이지에 속하는 각 슬롯은 다른 노드의 패킷 성공 또는 충돌에 의해 각각 확률  $q$  또는 확률  $(C-q)$ 로 지연될 수 있으므로,  $B_j$ 는

$$B_j = \{1 + qT_s + (C-q)T_c\}b_j$$

이 된다. 여기서  $q$ 는  $q = (n-1)r(1-r)^{n-2}$ 으로 다른 노드들 중 단 하나의 노드만이 패킷 전송을 시도하여 성공할 확률이다. 따라서,  $T_s = T_c$ 를 가정하면,  $D_i$ 는

$$D_i = (1 + CT_s) \sum_{j=0}^i b_j + iT_c$$

이 된다. 그런데,  $i$ 개의 재전송 후 성공할 확률은  $C^i(1-C)(1-C^M)^{-1}$ 이므로,  $\eta = (1-C)(1-C^M)^{-1}$ 라 할 때, 자기 패킷의 전송 시간을 포함한 평균 매체 접속 지연  $D$ 는

$$\begin{aligned} D &= \sum_{i=0}^{M-1} \eta C^i D_i \sigma + T_s - T_{ack} \\ &= \sigma \eta \sum_{i=0}^{M-1} C^i \left\{ (1 + CT_s) \sum_{j=0}^i b_j + iT_c \right\} + T_s - T_{ack} \end{aligned}$$

이 된다. 여기서,  $T_{ack}$ 는 ACK 패킷 전송시간이다.

### IV. 수치 해석 및 모의실험

제안된 분석 과정에 대한 수치 해석을 수행하고 이를 모의실험으로 검증하였다. 모의실험은 ns-2 버전 2.33을 사용하였다[8]. 수치 해석 및 모의실험을 위해, [5]에서 사용한 파라미터와 유사한, 표 1의 802.11b 시스템 파라미터들을 사용하였다.

표 1. 시스템 파라미터  
Table 1. System Parameters

$L$	500 바이트
$m$	5 회
$M$	7 회
$\overline{CW}_{min}$	32 슬롯
$T_s$	48 슬롯
$T_c$	48 슬롯
$T_{ack}$	15.2 슬롯
$\sigma$	20 $\mu$ sec
$R$	11 Mbps

먼저, 제안된 분석 모델이 매우 빠른 수치 결과를 제공할 수 있음을 표 2에서 보인다. 표 2는 식 (3)과 (4)의 계산 반복 횟수가 5회일 때 이미 충돌 확률이 소수점 이하 6째 자리까지 수렴됨을 보인다. 마코프 체인을 사용한 분석 기법이 통상 수치해석에 긴 시간을 소비 하는 것과 대비된다.

표 2. 충돌확률의 수렴 예( $n=16$ , 총부하=0.6)  
Table 2. Convergence of Collision Prob.

회	전송 시도율, $r$	충돌확률, $C$
1	0.026802	0.334701
2	0.027067	0.337407
3	0.027047	0.337212
4	0.027049	0.337228
5	0.027049	0.337227
6	0.027049	0.337227

그림 2는 네트워크 총 부하의 변화에 대한 충돌 확률의 추세와 정확도를 보인다. 네트워크 총 부하는  $n\lambda L/R$ 로서 네트워크에 인가된 정규화된 총 부하이다. 동일한 부하인 경우라도 노드가 많으면 충돌 확률이 클 것이라는 자명한 사실을 확인할 수 있다. 그림은 부하가 아주 커지면서 모의실험과 약간의 차이를 보이나 매우 정확한 결과라 할 수 있다.

그림 3은 매체 접속 지연을 보인다. 충돌 확률과 유사한 추세를 보인다. 매체 접속 지연도 네트워크 부하가 클 때 모의실험과 약간의 차이를 보이나 역시 정확한 결과

를 보인다. 그림 4는 네트워크의 총 처리율을 보인다. 네트워크 부하가 0.4 부근에서 네트워크 처리율이 30% 정도로 포화됨을 알 수 있다. 네트워크 부하가 작을 때는 거의 선형적으로 증가하다가, 부하가 커지면 포화 영역에 머무른다. 특히, 노드가 많은 경우는 포화 영역에 도달되기 전 (즉, 총부하=0.35일때)에 최고 처리율을 거침을 알 수 있다.

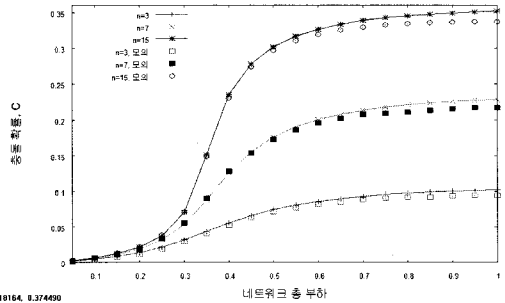


그림 2. 충돌 확률  
Fig. 2 Collision Probability

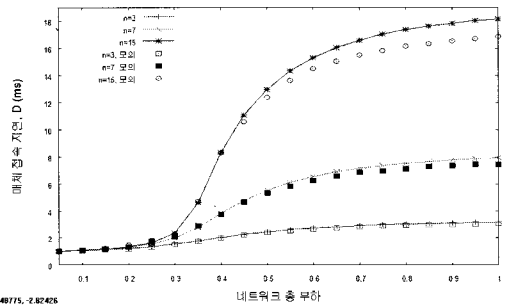


그림 3. 매체 접속 지연  
Fig. 3 MAC Access Delay

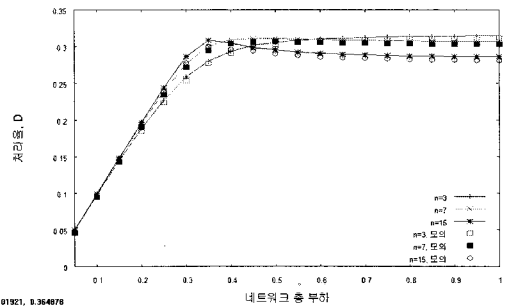


그림 4. 네트워크 총 처리율  
Fig. 4 Network Total Throughput

## V. 결론

본 논문은 IEEE 802.11 DCF에 대한 효율적인 정상 상태 분석 방법을 제시하였다. 포화 상태의 전송 시도율 계산 결과를 토대로, 이를 포화상태의 평균 패킷 서비스 시간 동안 패킷 도착 확률로 근사하여 정상 상태의 전송 시도율을 계산하였다. 이 방식은 마코프 체인 방식보다 훨씬 덜 복잡하며, 모의실험 결과와 비교하였을 때 매우 정확한 결과를 예측할 수 있음을 보였다. 향후 과제로는 포아송 분포가 아닌 On-Off 트래픽과 같은 다른 패킷 도착 분포에 대한 분석, 그리고 802.11e EDCA에 대한 이 분석 방식의 적용을 들 수 있다.

## 참고문헌

- [1] IEEE 802.11 Standard Part II, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," 2007.
- [2] Bianchi, G., "Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function," IEEE J. Select. Areas Commun. 18, pp. 535-547, 2000.
- [3] 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, Proc. of ICIC2007, pp. 1223-1232, Aug. 2007.
- [4] H. Zhai, Y. Kwon, and Y. Fang, "Performance analysis of IEEE 802.11 MAC protocols in wireless LANs," Wireless Commun. and Mobile Computing, vol. 4, pp. 917 - 931, 2004.
- [5] D. Malone, K. Duffy, and D. Leith, "Modeling the 802.11 distributed coordination function in non-saturated heterogeneous conditions," IEEE/ACM Trans. Networking, vol. 15, no. 1, pp. 159 - 172, Feb. 2007.
- [6] Tickoo O., and Sikdar B., "Modeling Queueing and Channel Access Delay in Unsaturated IEEE 802.11 Random Access MAC Based Wireless Networks," IEEE Trans. on Networking, vol. 16, no. 4, Aug. 2008.
- [7] Kumar A., Altman E., Miorandi D., and Goyal M.,

"New Insights From a Fixed-Point Analysis of Single Cell IEEE 802.11 WLANs," IEEE/ACM Trans. on Networking, vol. 15, no. 3, Jun. 2007.

[8] <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-build.html>.

## 저자소개

이계상 (Kye-Sang Lee)



1981 서울대학교 전자공학과 석사  
1997 KAIST 전기전자공학 박사  
1982~1997 ETRI 선임연구원  
1997~현재 동의대학교 정보통신  
공학과 재직