

# IEEE 802.11 무선 LAN의 최대 용량을 위한 최적의 RTS-CTS Threshold

최우용<sup>†</sup>

한국전자통신연구원 이동통신연구소

## Optimal RTS-CTS Threshold to Maximize the Capacity of IEEE 802.11 WLAN

Woo-Yong Choi

Mobile Telecommunication Research Lab., Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon, 305-350

In this paper, the selective use of RTS and CTS frames is considered to analyze the capacity of IEEE 802.11 WLAN (Wireless Local Area Network). The RTS and CTS frames are used to transmit the data frames longer than dot11RTSThreshold according to IEEE 802.11 specification. The analysis of the optimal RTS-CTS threshold is derived to maximize the capacity of IEEE 802.11 WLAN. And, numerical examples are also presented for IEEE 802.11 a and b WLANs.

**Keyword:** IEEE 802.11, MAC, DCF, capacity

### 1. 서론

현재 WLAN (Wireless Local Area Network)의 표준화 작업은 크게 IEEE 802.11과 유럽의 ETSI BRAN을 통해서 진행되고 있다. (IEEE Std 802.11 (1999), IEEE Std 802.11a (1999), IEEE 802.11b (1999), ETSI TS 101 761-1 (2000), ETSI TS 101 761-2 (2001)) IEEE 802.11은 WLAN에서 발생할 수 있는 hidden node problem을 해결하기 위해서 기존의 유선 랜에서의 Ethernet 프로토콜을 개선한 RTS (Request to Send), CTS (Clear To Send) 프레임을 통한 비연결 지향 프로토콜인 DCF (Distributed Coordination Function)에 기초하고 있으며, ETSI BRAN의 HIPERLAN Type 2는 IEEE 802.11과 달리 새로 제안된 연결 지향 프로토콜에 기초하고 있다.

IEEE 802.11의 DCF 프로토콜의 용량을 분석한 연구로는 Bianchi, *et al.* (1996), Bianchi (1998), Cali, *et al.* (1998), Foh and Zukerman (2001)이 있는데 Bianchi, *et al.* (1996)에서는 DCF 프로

토콜에서 어떤 MSDU (MAC Service Data Unit)를 전송할 때 전송 실패로 인한 재전송 시에 CW (Contention Window)가 증가하는 것을 고려하지 않고 고정된 CW를 사용하였으며, Bianchi (1998)에서는 Bianchi, *et al.* (1996)의 방법을 개선하여 backoff 단계 시 CW의 증가를 고려하였으나 IEEE 802.11 (IEEE Std 802.11(1999), IEEE Std 802.11a (1999), IEEE 802.11b (1999))에 따르면 WM (Wireless Media)의 최초 접근 시에 backoff를 하지 않음에도 불구하고 backoff를 하는 것으로 분석되었다. 그리고 Bianchi, *et al.* (1996), Bianchi (1998)에서는 분석의 편의상 모든 STA이 데이터 프레임의 길이에 관계 없이 RTS, CTS 프레임을 이용한다고 고려하였는데 이는 IEEE 802.11의 DCF 프로토콜과 다르다. IEEE 802.11에 따르면 데이터 프레임이 어떤 임계치 (dot11RTSThreshold) 보다 작거나 같을 경우 RTS, CTS 프레임을 사용하지 않고 물리적인 carrier sense만을 통하여 데이터 프레임을 전송하며 데이터 프레임이 dot11RTSThreshold보다 클 경우 RTS, CTS 프레임을 전송한 후 데이터 프레임을 전송한다. 이는 재전송

<sup>†</sup>연락처: 최우용, 305-350 대전시 유성구 가정동 161번지 한국전자통신연구원 이동통신연구소, Fax : 042-860-6732, e-mail : wychoi53@etri.re.kr

2002년 5월 접수, 2회 수정 후 2003년 5월 게재 승인

시 WM에 미치는 트래픽 부하를 고려하여 비교적 크기가 큰 데이터 프레임의 전송 시에만 RTS, CTS 프레임을 전송함으로써 RTS, CTS 프레임의 지속적인 전송으로 인한 WM의 비효율적인 사용을 막기 위한 것으로서, WLAN의 용량 분석 시에 반드시 고려되어야 한다. 그리고 데이터 프레임의 전송 시에 RTS, CTS 프레임을 전송할지, 하지 않을지를 결정하기 위한 임계치인 dot11RTSThreshold는 WLAN의 용량을 고려하여 WLAN의 용량이 최대가 되도록 결정되어야 한다. Cali, *et al.* (1998)에서는 RTS, CTS 프레임을 사용하지 않는 DCF 프로토콜의 성능 분석 방법을 제시하였으며, Foh and Zukerman (2001)에서는 여러 개의 STA이 동시에 프레임을 전송하는 경우 해당되는 여러 개의 프레임이 모두 성공적으로 전송되기 위하여 필요한 총 소요 시간을 계산하였다.

본 논문에서는 Bianchi, *et al.* (1996), Bianchi (1998)의 WLAN 용량 분석 방법을 개선하여 Bianchi, *et al.* (1996), Bianchi (1998)에서 고려하지 못한 사항을 모두 고려하여 IEEE 802.11 기반의 WLAN의 용량 분석 방법을 제시하고, WLAN의 용량을 최대로 하는 RTS-CTS 방법의 임계치인 dot11RTSThreshold를 구하는 방법을 제시하고자 한다. 특히 WLAN의 용량 증가를 위한 최적의 dot11RTSThreshold에 관한 연구는 아직까지 문헌에서 이루어지지 않았으며 본 논문의 계산 결과에 따르면 이를 통하여 WLAN의 용량이 매우 크게 증가할 수 있음을 알 수 있다.

다음 절에서는 Bianchi, *et al.* (1996), Bianchi (1998)의 방법을 개선한 WLAN 용량 분석 방법을 제시하고, 3절에서는 WLAN의 용량을 최대로 하는 RTS-CTS 방법의 임계치인 dot11RTSThreshold의 계산 방법을 제시할 것이다. 그리고 4절에서는 IEEE 802.11a (IEEE Std 802.11a (1999))와 IEEE 802.11b (IEEE Std 802.11b (1999))를 지원하는 WLAN의 용량 분석과 최적의 dot11RTSThreshold의 계산 결과를 제시할 것이다. 마지막으로 5

절에서 결론을 맺는다.

## 2. IEEE 802.11 WLAN의 용량 분석

BSS (Basic Service Set) 당  $n (\geq 2)$ 개의 STA이 존재한다고 가정하자. 그리고 각 STA은 데이터 프레임을 전송한 후에 즉시 새로운 데이터 프레임을 전송하려고 계속적으로 시도한다고 가정하자. 그리고 backoff 단계  $i$ 에서 WM를 접근하기 위하여 사용하는 contention window인  $CW(i) = 2^{i-1} CW_{min} + 2^{i-1} - 1$  이라고 하자(이 때, backoff 단계  $i$ 는 1에서 최대  $m$ 까지 가능하다고 한다). 그러면 Bianchi (1998)와 유사한 방법을 따르면 <그림 1>에서 WM가 idle한 타임 슬롯  $t$  초기에 RTS 프레임을 전송하거나 데이터 프레임을 전송하기 위하여 기다려야 하는 타임 슬롯의 개수  $b(t)$ 와 time slot  $t$ 에서의 backoff 단계  $s(t)$ 는 다음의 전이 확률을 갖는 Markov chain을 형성한다(이 때, <그림 1>에서 WM를 접근할 때 DIFS (DCF InterFrame Space)에 포함되는 타임 슬롯은  $\{s(t), b(t)\}$ 을 정의할 때 제외된다.  $\{s(t), b(t)\}$ 는 WM가 idle하고 DIFS에 포함되지 않는 타임 슬롯들만을 연결할 때 정의되는 Markov chain이다. 그리고 편의상 STA이 새로운 데이터 프레임을 전송하기 위하여 최초로 WM를 접근할 때  $s(t) = 0$ 이라고 한다).

$$P\{s(t+1) = i, b(t+1) = k \mid s(t) = i, b(t) = k+1\} = 1$$

for  $i = 1, 2, \dots, m, k = 0, 1, \dots, CW(i)-1$

$$P\{s(t+1) = 0, b(t+1) = 0 \mid s(t) = i, b(t) = 0\} = 1-p$$

for  $i = 0, 1, \dots, m$

$$P\{s(t+1) = i, b(t+1) = k \mid s(t) = i-1, b(t) = 0\} = p / (CW(i)+1)$$

for  $i = 1, 2, \dots, m, k = 0, 1, \dots, CW(i)$

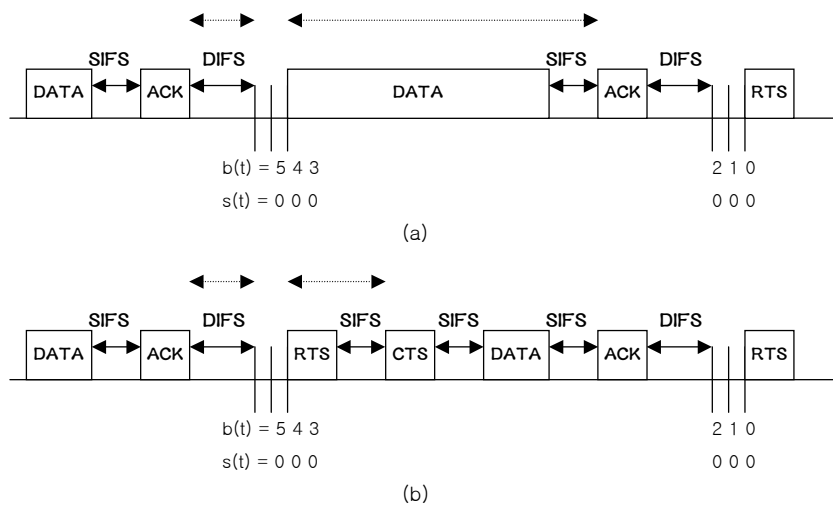


그림 1. DCF의 RTS-CTS 방법을 사용하지 않는 경우와 RTS-CTS 방법을 사용하는 경우의 데이터 전송 방식 : (a) RTS-CTS 방법을 사용하지 않는 경우  
(b) RTS-CTS 방법을 사용하는 경우 (점선 화살표:  $W_3$ 에 반영되는 부분).

$$P\{s(t+1) = m, b(t+1) = k \mid s(t) = m, b(t) = 0\} \\ = p / (CW(m)+1), \text{ for } k = 0, 1, \dots, CW(m)$$

(앞에서 정의되지 않은 전이 확률은 모두 0이며  $p$ 는 어떤 임의의 타임 슬롯에서 RTS 프레임이나 데이터 프레임을 전송할 때 다른 STA와 충돌이 발생할 확률이다.)

Bianchi (1998)와 유사한 방법을 따르면  $b_{i,0} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t) = i, b(t) = 0\}$ 이라고 할 때, 다음의 관계식을 유도할 수 있다( $i = 0, 1, \dots, m$ ).

$$1 = b_{0,0} + \frac{p^m}{1-p} \left(1 + \frac{CW(m)}{2}\right) b_{0,0} + \sum_{i=1}^{m-1} \left(1 + \frac{CW(i)}{2}\right) p^i b_{0,0} \\ = b_{0,0} \left(1 + \frac{p^m}{1-p} \left(1 + \frac{CW(m)}{2}\right) + \sum_{i=1}^{m-1} p^i \left(1 + \frac{CW(i)}{2}\right)\right)$$

따라서  $b_{0,0}$ 를 다음의 식과 같이 유도할 수 있다.

$$b_{0,0} = \frac{1}{\left(1 + \frac{p^m}{1-p} \left(1 + \frac{CW(m)}{2}\right) + \sum_{i=1}^{m-1} p^i \left(1 + \frac{CW(i)}{2}\right)\right)}$$

$\tau$ 를 어떤 STA이 앞에서 설명한  $\{s(t), b(t)\}$ 가 정의된 임의의 타임 슬롯에 RTS 프레임 혹은 데이터 프레임을 전송할 확률이라고 하면  $\tau$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{i,0} = \frac{b_{0,0}}{1-p} = \frac{1}{(1-p) \left(1 + \frac{p^m}{1-p} \left(1 + \frac{CW(m)}{2}\right) + \sum_{i=1}^{m-1} p^i \left(1 + \frac{CW(i)}{2}\right)\right)}$$

그리고 Bianchi (1998)와 같이  $p$ 와  $\tau$  사이의 다음의 관계식을 유도할 수 있다.

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

앞의 식을 이용하면 수치적으로  $p$ 를 구할 수 있다. 그리고  $p$ 를 이용하면 앞의 식을 이용하여  $\tau$  또한 구할 수 있을 것이다.  $n$ 개의 active STA 중에서 적어도 하나의 프레임 전송이  $\{s(t), b(t)\}$ 가 정의된 타임 슬롯에서 발생할 확률  $p_r$ , 발생한 프레임 전송이 성공할 확률  $p_s$ , 그리고 연속적으로 idle한 타임 슬롯의 평균 개수  $E[\Psi]$ 를 다음과 같이 구할 수 있다(<그림 1>에서 DIFS는  $E[\Psi]$ 의 계산 시 포함되지 않는다).

$$E[\Psi] = 1/p_r - 1 \text{ where } p_r = 1 - (1 - \tau)^n$$

그러면 BSS를 통한 데이터 프레임의 payload를 전송하기 위한 throughput  $S$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S = \frac{p_s L_{PAYLOAD}}{E[\Psi] + p_s p_{RTS} W_1 + p_s (1 - p_{RTS}) W_2 + (1 - p_s) W_3} \quad (1)$$

식 (1)에서  $W_1$ 은 RTS-CTS 방법을 통하여 전송할 경우 DIFS를

포함하여 RTS, CTS, 데이터, ACK 프레임을 전송하기 위해서 필요한 평균 타임 슬롯 개수를 의미하고,  $W_2$ 는 RTS-CTS 방법을 사용하지 않을 경우 DIFS를 포함하여 데이터, ACK 프레임을 전송하기 위해서 필요한 평균 타임 슬롯 개수를 의미하고,  $W_3$ 는 프레임을 전송할 경우 충돌이 발생할 때 DIFS를 포함하여 현재 진행중인 프레임의 전송이 끝나고 SIFS (Short InterFrame Space) 시간이 경과할 때까지 필요한 평균 타임 슬롯 개수를 의미한다(단,  $W_3$ 의 계산 시에 충돌에 참가한 어떤 STA이 만약 RTS-CTS 방법을 쓰는 경우 이 STA의 프레임 전송 시간 중 실제  $W_3$ 의 계산에 반영되는 타임 슬롯 개수는 RTS 프레임을 전송하고 SIFS 시간이 경과하여 CTS 프레임이 도착하지 않았다는 것을 RTS 프레임을 전송한 STA이 아닌 데 필요한 시간이다). <그림 1>에서 점선으로 된 화살표는  $W_3$ 의 계산에 실제 반영되는 부분을 나타낸다. 그리고  $p_{RTS}$ 는 데이터 프레임의 전송 시에 RTS-CTS 방법을 사용할 확률을 의미하며  $L_{PAYLOAD}$ 은 데이터 프레임 내의 payload만을 전송하는 데 필요한 평균 타임 슬롯 개수를 의미한다.

### 3. 최적의 dot11RTSThreshold 계산 방법

데이터 프레임의 길이의 확률변수  $U$ 의 distribution function을  $F(\cdot)$ 라 하자. 그리고 RTS, CTS, ACK 프레임의 길이를 각각  $L_{RTS}$ ,  $L_{CTS}$ ,  $L_{ACK}$ 라 하며, 물리 계층의 헤더를 전송하는데 소요되는 시간을  $L_{PHY}$ 라 하고, 그리고 channel bit rate과 타임 슬롯 길이를 각각  $R$ ,  $T$ 라 할 때 식 (1)의  $p_{RTS}$ ,  $W_1$ ,  $W_2$ 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$p_{RTS} = 1 - F(\text{dot11RTSThreshold}) \\ W_1 = \frac{L_{RTS} + L_{CTS} + E[U \mid U > \text{dot11RTSThreshold}] + L_{ACK}}{R \cdot T} \\ + \frac{4L_{PHY} + DIFS + 3SIFS}{T} \quad (2) \\ W_2 = \frac{E[U \mid U \leq \text{dot11RTSThreshold}] + L_{ACK}}{R \cdot T} + \frac{2L_{PHY} + DIFS + SIFS}{T}$$

각 STA이 프레임을 전송할 확률  $\tau$ 를 이용하면  $\{s(t), b(t)\}$ 가 정의된 타임 슬롯에서 현재 프레임을 전송중인 STA의 개수  $J$ 의 분포를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P\{J = j\} = \binom{n}{j} \tau^j (1 - \tau)^{n-j}, j = 0, 1, \dots, n \quad (3)$$

그리고  $W_3$ 의 정의에서 충돌이 발생하였을 경우 충돌 시에 발생한 프레임 전송에 참여한 STA의 개수  $K$ 의 분포는 식 (3)의  $J$ 의 분포를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P\{K = k\} = P\{J = k \mid J \geq 2\} = \frac{P\{J = k\}}{P\{J \geq 2\}}, k = 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

충돌에 참여한 STA 중 RTS-CTS 방법을 사용하지 않는 STA의

개수를  $\tilde{K}$ 라 할 때  $K = k$ 일 경우  $k$ 개의 STA 중 RTS-CTS 방법을 사용하지 않은 STA의 개수  $\tilde{K} | K = k$ 의 분포는 다음과 같다.

$$P\{\tilde{K} = \tilde{k} | K = k\} = \binom{k}{\tilde{k}} (1 - p_{RTS})^{\tilde{k}} p_{RTS}^{k - \tilde{k}}, k = 2, 3, \dots, n, \tilde{k} = 0, 1, \dots, k \quad (5)$$

식 (4)와 (5)를 이용하면  $\tilde{K}$ 의 분포를 다음의 식과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P\{\tilde{K} = \tilde{k}\} &= \sum_{k=\max(2, \tilde{k})}^n P\{K = k\} P\{\tilde{K} = \tilde{k} | K = k\} \\ &= \sum_{k=\max(2, \tilde{k})}^n \frac{P\{J = k\} \binom{k}{\tilde{k}} (1 - p_{RTS})^{\tilde{k}} p_{RTS}^{k - \tilde{k}}}{P\{J \geq 2\}}, \tilde{k} = 0, 1, \dots, n \end{aligned} \quad (6)$$

$W_3$ 의 정의에서 설명한 대로 충돌에 참가한 어떤 STA이 만약 RTS-CTS 방법을 쓰는 경우 이 STA의 프레임 전송 시간 중 실제  $W_3$ 의 계산에 반영되는 시간은 DIFS를 포함하여 RTS 프레임을 전송하고 SIFS 시간이 경과하기까지의 시간이다. 따라서 만약  $\tilde{K} = 0$ 인 경우 충돌에 참가한 모든 STA이 RTS-CTS 방법을 사용하기 때문에  $W_3$ 는 RTS 프레임을 전송하고 SIFS가 경과하기까지의 시간이고 그 외의 경우, 즉  $\tilde{K} = \tilde{k} (> 0)$ 일 경우 길이가  $\text{dot11RTSThreshold}$ 보다 작거나 같은  $\tilde{k}$ 개의 데이터 프레임 중 가장 길이가 긴 데이터 프레임을 전송하고 SIFS가 경과하기까지의 시간이며 가장 길이가 긴 데이터 프레임의 길이  $Q_{\tilde{k}}$ 의 distribution function  $G_{\tilde{k}}(x)$ 는  $\tilde{K}$ 개의 데이터 프레임이 모두  $x$ 보다 작을 확률이다. 이를 이용하면  $G_{\tilde{k}}(x)$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} G_{\tilde{k}}(x) &= (P\{U \leq x | U \leq \text{dot11RTSThreshold}\})^{\tilde{k}}, x \leq \text{dot11RTSThreshold} \\ G_{\tilde{k}}(x) &= 1, x > \text{dot11RTSThreshold} \end{aligned} \quad (7)$$

따라서 식 (1)의  $W_3$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} W_3 &= \frac{P\{\tilde{K} = 0\} \cdot L_{RTS} + \sum_{\tilde{k}=1}^n (P\{\tilde{K} = \tilde{k}\} \cdot E[Q_{\tilde{k}}])}{R \cdot T} + \frac{L_{PHY} + DIFS + SIFS}{T} \\ &= \frac{P\{\tilde{K} = 0\} \cdot L_{RTS} + \sum_{\tilde{k}=1}^n (P\{\tilde{K} = \tilde{k}\} \cdot \left( \int_{x=0}^{\infty} (1 - G_{\tilde{k}}(x)) dx \right))}{R \cdot T} \\ &\quad + \frac{L_{PHY} + DIFS + SIFS}{T} \end{aligned} \quad (8)$$

식 (1)에서  $p_s, L_{PAYLOAD}, E[\Psi]$ 은  $\text{dot11RTSThreshold}$ 와 무관하게 계산될 수 있는 값이다. 따라서 식 (1)의 throughput  $S$ 를 최대화하는  $\text{dot11RTSThreshold}$ 를 구하기 위해서는  $p_s p_{RTS} W_1 + p_s (1 - p_{RTS}) W_2 + (1 - p_s) W_3$ 을 최소화 하는  $\text{dot11RTSThreshold}$ 를 구하면 된다. 그런데,  $p_s p_{RTS} W_1 + p_s (1 - p_{RTS}) W_2 + (1 - p_s) W_3$ 을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &p_s p_{RTS} W_1 + p_s (1 - p_{RTS}) W_2 + (1 - p_s) W_3 \\ &= p_s p_{RTS} \left( \frac{L_{RTS} + L_{CTS} + E[U | U > \text{dot11RTSThreshold}] + L_{ACK} + 4L_{PHY} + DIFS + 3SIFS}{R \cdot T} \right) \\ &\quad + p_s (1 - p_{RTS}) \left( \frac{E[U | U \leq \text{dot11RTSThreshold}] + L_{ACK} + 2L_{PHY} + DIFS + SIFS}{R \cdot T} \right) \\ &\quad + (1 - p_s) \left( \frac{P\{\tilde{K} = 0\} \cdot L_{RTS} + \sum_{\tilde{k}=1}^n (P\{\tilde{K} = \tilde{k}\} \cdot \left( \int_{x=0}^{\infty} (1 - G_{\tilde{k}}(x)) dx \right))}{R \cdot T} + \frac{L_{PHY} + DIFS + SIFS}{T} \right) \\ &= p_s p_{RTS} \left( \frac{L_{RTS} + L_{CTS} + E[U | U > \text{dot11RTSThreshold}] + 2L_{PHY} + 2SIFS}{R \cdot T} \right) \\ &\quad + p_s (1 - p_{RTS}) \left( \frac{E[U | U \leq \text{dot11RTSThreshold}]}{R \cdot T} \right) \\ &\quad + (1 - p_s) \left( \frac{P\{\tilde{K} = 0\} \cdot L_{RTS} + \sum_{\tilde{k}=1}^n (P\{\tilde{K} = \tilde{k}\} \cdot \left( \int_{x=0}^{\infty} (1 - G_{\tilde{k}}(x)) dx \right))}{R \cdot T} \right) \\ &\quad + \frac{(1 + p_s) L_{PHY} + DIFS + SIFS}{T} + \frac{p_s L_{ACK}}{R \cdot T} \\ &= (1 - p_s) \left( \frac{P\{\tilde{K} = 0\} \cdot L_{RTS} + \sum_{\tilde{k}=1}^n (P\{\tilde{K} = \tilde{k}\} \cdot \left( \int_{x=0}^{\infty} (1 - G_{\tilde{k}}(x)) dx \right))}{R \cdot T} \right) \\ &\quad - p_s F(\text{dot11RTSThreshold}) \left( \frac{L_{RTS} + L_{CTS} + 2L_{PHY} + 2SIFS}{R \cdot T} \right) \\ &\quad + \frac{(1 + p_s) L_{PHY} + DIFS + SIFS}{T} + \frac{p_s L_{ACK} + p_s E[U]}{R \cdot T} + p_s \left( \frac{L_{RTS} + L_{CTS} + 2L_{PHY} + 2SIFS}{R \cdot T} \right) \end{aligned}$$

앞 식의 마지막 3개 항은 모두  $\text{dot11RTSThreshold}$ 와 무관하므로 식 (1)의 throughput  $S$ 를 최대화 하는  $\text{dot11RTSThreshold}$ 를 구하기 위해서는 다음을 최소화 하는  $\text{dot11RTSThreshold}$ 를 구하면 된다.

$$\begin{aligned} &(1 - p_s) \left( P\{\tilde{K} = 0\} \cdot L_{RTS} + \sum_{\tilde{k}=1}^n (P\{\tilde{K} = \tilde{k}\} \cdot \left( \int_{x=0}^{\infty} (1 - G_{\tilde{k}}(x)) dx \right)) \right) \\ &\quad - p_s F(\text{dot11RTSThreshold}) (L_{RTS} + L_{CTS} + 2R \cdot L_{PHY} + 2R \cdot SIFS) \end{aligned} \quad (9)$$

#### 4. 계산 결과

본 절에서는 IEEE 802.11a, IEEE 802.11b를 지원하는 WLAN의 용량 분석과 식 (1)의 throughput을 최대화 하는 최적의  $\text{dot11RTSThreshold}$ 의 계산 결과를 제시하고자 한다. 이를 위해서는 데이터 프레임의 길이  $U$ 의 분포가 필요한데 여기서는  $U$ 는 (MAC 헤더 길이, MAC 헤더 길이 + MAC payload 최대 허용 길이)의 범위를 갖는 Uniform 분포를 따른다고 한다. (IEEE Std 802.11 (1999)에 따르면 MAC 헤더 길이와 MAC payload 최대 허용 길이는 각각 224 bits와 18,496 bits이다. 편의상 MAC 헤더에는 FCS 필드가 포함되었다.) 식 (1)의 throughput을 구하기 위해서는 다음의 parameter의 값이 필요하다.

- CWmin, CWmax (contention window의 최소값과 최대값)
- m (backoff의 최대 허용 단계)
- SIFS, DIFS (Short InterFrame Space, DCF InterFrame Space)
- $L_{PAYLOAD}$  (데이터 프레임의 payload의 평균 길이)
- $L_{RTS}, L_{CTS}$  (RTS 프레임과 CTS 프레임의 길이)

표 1. 계산 결과를 위해 사용한 parameter의 값 (IEEE 802.11a)

Parameter	값
CW <sub>min</sub>	15
CW <sub>max</sub>	1023
m	7
SIFS	16 $\mu$ s
DIFS	34 $\mu$ s
L <sub>PAYLOAD</sub>	20
L <sub>RTS</sub>	160 bits
L <sub>CTS</sub>	112 bits
L <sub>ACK</sub>	112 bits
L <sub>PHY</sub>	24 $\mu$ s
R	54 Mbps
T	9 $\mu$ s

표 2. 계산 결과를 위해 사용한 parameter의 값 (IEEE 802.11b)

Parameter	값
CW <sub>min</sub>	31
CW <sub>max</sub>	1023
m	6
SIFS	10 $\mu$ s
DIFS	50 $\mu$ s
L <sub>PAYLOAD</sub>	43
L <sub>RTS</sub>	160 bits
L <sub>CTS</sub>	112 bits
L <sub>ACK</sub>	112 bits
L <sub>PHY</sub>	192 $\mu$ s
R	11 Mbps
T	20 $\mu$ s

- L<sub>ACK</sub> (ACK 프레임의 길이)
- L<sub>PHY</sub> (물리 계층의 헤더 길이)
- R (channel bit rate)
- T (타임 슬롯의 길이)

<표 1>과 <표 2>는 각각 IEEE 802.11a (IEEE Std 802.11a (1999))와 IEEE 802.11b (IEEE Std 802.11b (1999))에서 앞의 parameter의 값을 나타낸 것이다. 그리고 <그림 2>는 식 (1) - (8)과 <표 1>과 <표 2>의 parameter의 값을 이용하여 구해진 n 개의 STA에 따른 IEEE 802.11a (IEEE Std 802.11a (1999))와 IEEE 802.11b (IEEE Std 802.11b (1999))의 WLAN의 이론적인 용량 분석 결과와 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 분석 결과를 나타내었다. <그림 2>의 이론적인 용량 분석 결과는 식 (1)의 S가 최대가 되는 최적의 RTS-CTS 방법의 임계치인 dot11RTSThreshold\* 값을 사용하여 얻어진 최대의 throughput S\*이다. 그리고 <그림 3>은 식 (9)를 이용하여 구해진 n개의 STA에 따른 IEEE 802.11a (IEEE Std 802.11a (1999))와 IEEE 802.11b(IEEE Std 802.11b (1999))의 WLAN의 throughput을 최대로 하는 최적의 dot11RTSThreshold 값에 해당하는 U의 distribution function 값인 F(dot11RTSThreshold\*)

의 이론적인 분석 결과와 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 분석 결과를 나타내었다. <그림 2>와 <그림 3>의 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 분석 결과는 각 경우별로 10<sup>8</sup>개의 타임 슬롯 동안 시뮬레이션을 함으로써 얻어졌다.

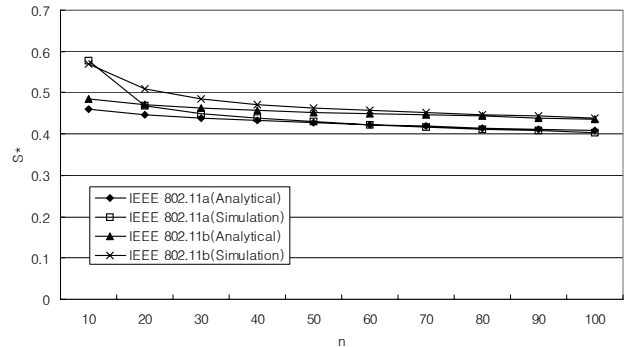


그림 2. 용량 분석 결과.

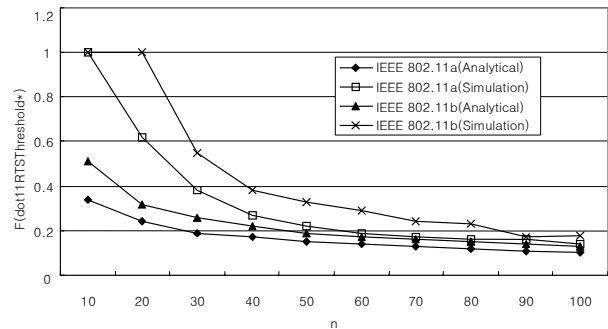


그림 3. 최적의 dot11RTSThreshold의 계산 결과에 해당하는 U의 distribution function 값인 F(dot11RTSThreshold\*)의 계산 결과.

<그림 2>에서 알 수 있듯이 n이 비교적 작은 값을 가지는 경우를 제외하면 throughput S\*의 이론적인 분석 결과와 컴퓨터 시뮬레이션 분석 결과는 매우 정확히 일치하는 것을 알 수 있다. STA의 개수인 n이 커짐에 따라서 IEEE 802.11a와 IEEE 802.11b의 throughput S\*는 작아진다. 그리고 대부분의 경우 IEEE 802.11b의 throughput이 IEEE 802.11a의 throughput보다 크다는 것을 알 수 있다. n = 10인 경우를 제외하면 IEEE 802.11b의 throughput이 IEEE 802.11a의 throughput보다 약 9% 큰 값을 가진다. <그림 3>에서 알 수 있듯이 최적의 dot11RTSThreshold의 이론적인 분석치는 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 분석치보다 작은 값을 가지며 n이 비교적 작은 값을 가지는 경우 이론적인 결과와 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 결과의 오차는 비교적 크다. 하지만 n이 커짐에 따라서 그 오차는 점점 줄어들어 n이 비교적 큰 값을 가지는 경우 이론적인 결과와 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 분석 결과는 비교적 정확히 일치하는 것을 알 수 있다. 계산 결과에 따르면 STA의 개수인 n이 커짐에 따라서 IEEE 802.11a와 IEEE 802.11b의 throughput이 최대가 되는 최적의 dot11RTSThreshold는 작아지며 IEEE 802.11b의 최적의 dot11RTS

Threshold가 IEEE802.11a의 최적의 dot11RTSThreshold보다 커진다는 것을 알 수 있다.

비록 그림으로 표현하진 않았지만 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 분석 결과에 따르면 dot11RTSThreshold의 잘못된 선택에 의하여 WLAN의 용량이 최소가 되는 경우와 비교할 때 최적의 dot11RTSThreshold에 의하여 WLAN의 용량은 IEEE 802.11a의 경우 평균적으로 약 17% 증가하며 IEEE 802.11b의 경우 평균적으로 약 14% 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 이러한 용량 증가는 STA의 개수  $n$ 이 커짐에 따라 점점 커지는데  $n=100$ 일 때 IEEE 802.11a의 경우 WLAN의 용량은 30% 증가하며 IEEE 802.11b의 경우 23% 증가한다(계산 결과에 따르면 WLAN의 용량이 최소가 되는 경우는 데이터 프레임의 길이에 관계없이 모든 데이터 프레임의 전송 시에 RTS, CTS 프레임을 전송하는 경우(즉,  $F(\text{dot11RTSThreshold}) = 0$ ) 이거나 데이터 프레임의 길이에 관계없이 모든 데이터 프레임의 전송 시에 RTS, CTS 프레임을 전송하지 않는 경우(즉,  $F(\text{dot11RTSThreshold}) = 1$ )이었다). 따라서 최적의 dot11RTSThreshold에 관한 연구는 WLAN의 용량 증가를 위하여 매우 중요함을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 IEEE 802.11 WLAN에서 RTS-CTS 방법을 데이터 프레임의 길이에 따라 선택적으로 사용하는 DCF 프로토콜에

대한 용량 분석과 WLAN의 용량이 최대가 되기 위한 RTS-CTS 방법의 임계치인 dot11RTSThreshold 분석 방법을 제시하였다.

## 참고문헌

- IEEE Std 802.11, *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, 1999.
- IEEE Std 802.11a, *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer Specifications: High Speed Physical Layer in the 5 GHz Band*, 1999.
- IEEE Std 802.11b, *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer Specifications: Higher Speed Physical Layer (PHY) Extension in the 2.4 GHz Band*, 1999.
- ETSI TS 101 761-1, *Broadband Radio Access Networks (BRAN); HIPERLAN Type 2; Data Link Control (DLC) Layer; Part 1: Basic Data Transport Functions*, 2000.
- ETSI TS 101 761-2, *Broadband Radio Access Networks (BRAN); HIPERLAN Type 2; Data Link Control (DLC) Layer; Part 2: Radio Link Control (RLC) Sublayer*, 2001.
- G. Bianchi, L. Fratta and M. Oliveri, Performance Evaluation and Enhancement of the CSMA/CA MAC Protocol for 802.11 Wireless LANs, *Proc. PIMRC 1996*, pp. 392 - 396, 1996.
- G. Bianchi, IEEE 802.11-Saturation Throughput Analysis, *IEEE Communications Letters*, vol. 2, pp. 318 - 320, 1998.
- F. Cali, M. Conti and E. Gregori, IEEE 802.11 Wireless LAN: Capacity Analysis and Protocol Enhancement, *Proc. INFOCOM 1998*, pp. 142 - 149, 1998.
- C. H. Foh and M. Zukerman, Performance Evaluation of IEEE 802.11, *Proc. VTC '01 Spring*, pp. 841 - 845, 2001.



최우용

포항공과대학교 산업공학과 공학사

포항공과대학교 산업공학과 공학석사

포항공과대학교 산업공학과 공학박사

현재: 한국전자통신연구원 이동통신연구소

선임연구원

관심분야: CDMA 이동통신시스템과 무선랜