

## IEEE 802.11 WLAN에서 패킷지연시간 분석

임석구\*

\*백석대학교 정보통신학부

e-mail:sklim@bu.ac.kr

## Analysis of Packet Delay in IEEE 802.11 Wireless LAN

Lim seog-ku\*

\*Div. of Information and Communications, BaekSeok University

**Abstract**

Wireless LAN(WLAN) is a rather mature communication technology connecting mobile terminals. IEEE 802.11 is a representative protocol among WLAN technologies. With the rising popularity of delay-sensitive real-time multimedia applications(video, voice and data) in IEEE 802.11 wireless LAN, it is important to study the MAC layer delay performance of WLANs. In this paper, performance for packet delay that recently have been proposed schemes is analysed in wireless LAN and proved performance results via simulation.

**1. 서론**

IEEE 802.11은 무선 랜(Wireless LAN) 시장의 급격한 성장과 함께 현재 가장 널리 사용되고 있는 무선 랜의 표준 기술 중 하나이다. IEEE 802.11 규격은 무선 랜을 위한 매체 액세스 제어(MAC, Medium Access Control) 부계층과 물리계층(PHY)을 정의한다[1]. IEEE 802.11 MAC 프로토콜은 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 방식을 기반으로 하며, DCF(Distributed Coordination Function)와 PCF(Point Coordination Function)를 포함한다. DCF 규격은 모든 스테이션이 동등한 관계에서 경쟁을 통해 채널을 사용하게 된다. 반면, PCF는 AP(Access Point)와 같은 중앙제어 노드의 관리 하에 폴링(Polling) 방식을 이용하여 스테이션들이 채널을 사용할 수 있게 관리하는 무경쟁 방식이다. DCF에는 데이터 패킷을 전송하기 위해 기본 액세스(Basic Access) 방식과 RTS/CTS (Ready To Send / Clear To Send) 방식이 있다.

현재까지 DCF 모델링과 수율과 지연 등과 같은 성능 파라미터에 관한 많은 연구가 진행 되어왔다 [2]-[9]. Bianchi는 2차원 마르코프 체인을 이용한

DCF의 성능 평가 모델을 제안하고 이를 시뮬레이션을 통하여 검증하였다[2]. Xiao는 Bianchi모델의 간단한 수정과 함께 DCF의 수율과 MAC 지연의 한계를 제시하였다[3]. Wu는 패킷 재전송 한계가 있는 경우를 고려함으로써 Bianchi의 모델을 개선하였다 [4]. Chatzimisios 등은 Wu의 마르코프 체인 모델을 이용하여 평균패킷지연, 패킷드롭확률, 평균패킷드롭 시간 등과 같은 성능 파라미터를 산출하였다[5]. Vukovic은 1차원 마르코프 체인 모델을 이용하여 DCF의 성능 평가 모델을 제안하고 평균패킷지연 등을 산출하였다[6]. 또한 Zhang 등은 2차원 마르코프 체인을 이용하여 액세스지연 등을 연구하였다[7]. 이외에도 다른 관점에서 패킷지연에 관한 연구결과들도 있었다[8][9].

본 논문에서는 패킷지연에 관해 현재까지 해석적으로 연구된 결과들을 비교분석하였으며, 이를 시뮬레이션을 이용하여 검증한다. 본 논문의 구성은 서론에 이어 2장에서는 IEEE 802.11의 백오프 과정에 대해서 설명하며, 3장에서는 해석적인 모델과 4장에서는 비교분석하려는 4가지 연구결과를 설명한다. 5장에서는 각 알고리즘의 성능을 해석적인 방법과 시뮬레이션을 통해 분석하였고 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

## 2. 평균패킷지연

### 2.1 Chatzimisios 모델

기본 액세스나 RTS/CTS 액세스인 경우에 대한 단순한 모델은 Chatzimisios에 의해 개발되었다[5]. 평균 패킷 지연은 다음과 같이 주어진다.

$$E_C[D] = \sum_{i=0}^m (E[X_i] \cdot k_i) \quad (1)$$

여기서  $X_i$ 는 성공적으로 전송된 패킷이  $i$ 번째 백오프 스테이지에서 지연되는 시간이다.  $k_i$ 는 성공적으로 전송된 패킷이  $i$ 번째 백오프 스테이지에 도달할 확률을 의미한다.  $E[X_i]$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$E[X_i] = d_i \cdot E[slot], \quad i \in [0, m] \quad (2)$$

여기서  $d_i$ 는 패킷이  $i$ 번째 백오프 스테이지에서 지연되는 평균 타임슬롯 수이며,  $E[slot]$ 은 평균 슬롯 타임이다.

$$d_i = \frac{W_i + 1}{2}, \quad i \in [0, m] \quad (3)$$

$$E[slot] = (1 - P_{tr}) \cdot \sigma + P_{tr} \cdot P_s \cdot T_s + P_{tr} \cdot (1 - P_s) \cdot T_c \quad (4)$$

$\sigma$ 는 슬롯타임의 크기이며, 확률  $k_i$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$k_i = \frac{p^i - p^{m+1}}{1 - p^{m+1}}, \quad i \in [0, m] \quad (5)$$

여기서  $(1 - p^{m+1})$ 는 패킷이 폐기되지 않을 확률이며,  $(p^i - p^{m+1}) / (1 - p^{m+1})$ 은 폐기되지 않은 패킷이  $i$ 번째 스테이지에 도달할 확률이다. 식 (2)~(5)으로부터 평균 패킷지연시간은 다음과 같다.

$$E_C[D] = E[slot] \cdot \sum_{i=0}^m \left[ \frac{W_i + 1}{2} \cdot \frac{p^i - p^{m+1}}{1 - p^{m+1}} \right] \quad (6)$$

### 2.2 Vukovic 모델

이 모델에서 시간지연은 모든 백오프 스테이지에서의 지연, 전송 실패에 따른 지연, 그리고 전송 성공에 의한 시간의 합이다. 평균 패킷 지연시간은 다음과 같이 주어진다[6].

$$E_V[D] = \sum_{j=0}^m [E[V_j] \cdot q_j] \quad (7)$$

여기서  $V_j$ 는  $j$ 번째 백오프 스테이지로부터 성공적

으로 전송된 패킷의 지연이고,  $q_j$ 는  $j$ 번째 백오프 스테이지로부터 패킷이 성공적으로 전송될 확률이다. 확률  $q_j$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$q_j = \frac{p^j}{1 - p^{m+1}} \cdot (1 - p), \quad j \in [0, m] \quad (8)$$

여기서  $(1 - p)$ 는 성공적으로 패킷이 전송될 확률이고,  $p^j$ 는 패킷이  $j$ 번째 스테이지에 도달할 확률이며,  $(1 - p^{m+1})$ 는 패킷이 폐기되지 않을 확률이다. 따라서 평균 지연  $E[V_j]$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$E[V_j] = T_s + j \cdot T_c + E[slot] \cdot \sum_{i=0}^j \left[ \frac{W_i - 1}{2} \right], \quad j \in [0, m] \quad (9)$$

여기서  $(W_i - 1)/2$ 는 평균 슬롯 수로 표현한  $i$ 번째 스테이지에서 지연되는 시간이고,  $E[slot]$ 은 평균 슬롯 타임의 길이이며 식 (4)와 같다.  $jT_c$ 는  $j$ 번째 스테이지에 도달할 때까지 충돌에 의해 소비되는 시간이고,  $T_s$ 는  $j$ 번째 스테이지에서 성공적으로 전송한 시간이다.

### 2.3 Zhang 모델

Zhang 모델에서 지연시간은 먼저 패킷 전송에 성공한 시간과 시간 사이의 간격( $D_{inter}$ )을 계산하고 이 중에서 재전송 횟수를 초과하여 폐기되는 패킷의 지연시간( $D_{drop}$ )을 제외함으로써 산출한다[7]. 따라서 이 모델에서의 평균 패킷지연시간은  $E_Z[D] = D_{inter} - D_{drop}$ 이다.

$D_{inter}$ 에 포함되는 시간의 종류는 4가지이다. 패킷 전송이 성공한 경우의 시간( $T_s$ ), 다른 스테이션의 전송성공에 따라서 채널이 busy로 감지됨에 따른 시간( $D_s$ ), 충돌에 의해 지연되는 시간( $D_c$ ), 그리고 백오프 타이머에 의한 지연시간( $T_{slot}$ )이다. 따라서  $D_{inter}$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} D_{inter} &= T_s + D_s + D_c + T_{slot} \\ &= nT_s + \frac{1 - (1 - \tau)^n - n\tau(1 - \tau)^{n-1}}{\tau(1 - \tau)^{n-1}} T_c \\ &\quad + \frac{1 - \tau}{\tau} \sigma \end{aligned} \quad (10)$$

여기서  $D_s = T_s(n - 1)$

$$D_c = \frac{1 - (1 - \tau)^n - n\tau(1 - \tau)^{n-1}}{\tau(1 - \tau)^{n-1}} T_c$$

$$T_{slot} = \frac{1 - \tau}{\tau} \sigma$$

패킷 전송과 전송 사이에 여러 개의 패킷이 폐기

될 수도 있다. 패킷의 폐기에 따른 시간은  $D_{inter}$  에서 제외하여야 한다.

$$D_{drop} = E[N_{drop}]E[T_{drop}]E[slot] \quad (11)$$

여기서  $E[N_{drop}]$ 은 폐기되는 패킷의 평균개수이고,  $E[T_{drop}]$ 은 패킷이 폐기될 때까지의 시간을 슬롯타임으로 나타낸 양이다.

마르코프 체인 모델에서 패킷이 최대전송회수  $m$  까지 전송해서도 충돌이 발생하고 이어서 추가적인 전송에서도 충돌이 발생하면 패킷을 폐기한다. 따라서 패킷 폐기확률은  $p^{m+1}$ 로 주어진다. 따라서 폐기되는 패킷의 평균개수는 다음과 같다.

$$E[N_{drop}] = \sum_{i=1}^{\infty} ip^{i(m+1)} = \frac{p^{m+1}}{(1-p^{m+1})^2} \quad (12)$$

$E[T_{drop}]$ 은  $(m+1)$ 번 충돌이 발생할 때까지의 시간을 슬롯타임으로 나타낸 양이므로 다음과 같이 산출된다.

$$E[T_{drop}] = \sum_{i=0}^m \frac{W_i + 1}{2} \quad (13)$$

$$= \begin{cases} \frac{W(2^{m+1} - 1) + (m+1)}{2} & m \leq m' \\ \frac{W(2^{m'+1} - 1) + 2^{m'} W(m - m') + (m+1)}{2} & m > m' \end{cases}$$

### 2.4 Kang 모델

Kang 모델에서 패킷지연은 3가지 부분으로 분류하였다[8]. 첫 번째는 idle 슬롯시간이고, 두 번째는 백오프 카운터 감소시간, 세 번째는 전송시간이다. 전송시간은 충돌시간과 성공시간을 모두 포함한다.

위 식으로부터 백오프 카운터 감소시간에 따른 지연시간은 다음과 같다.

$$D_b = \left[ \frac{(1-p^{m+1}) \times (CW_0 - 1)}{2} + \sum_{i=1}^m \frac{(p^i - p^{m+1}) CW_i}{2} \right] \times E[slot] / (1-p^{m+1}) \quad (14)$$

패킷을 전송할 때 마다 패킷의 전송성공 확률은  $1-p$ 이고 충돌할 확률은  $p$ 이므로 충돌시간과 성공시간을 고려한 전송시간은 다음과 같이 주어진다.

$$D_t = \frac{\sum_{i=0}^m (1-p)p^i (T_s + iT_c)}{1-p^{m+1}} \quad (15)$$

따라서 패킷의 지연시간은 다음과 같다.

$$T_{wait} = \sigma + D_b + D_t \quad (16)$$

패킷을 성공적으로 전송한 후, 그 스테이션은

DIFS 시간이 경과한 후, 첫 번째 슬롯을 액세스할 수 있는데, 이것은 새로운 백오프 카운터가 0의 값을 취할 때 발생하며, 그 확률값은 다음과 같다.

$$B_0 = \frac{1}{CW_{min} + 1} \quad (17)$$

기다리지 않고 패킷을 전송하는 평균 회수는 다음과 같다.

$$S = B_0 + B_0^2 + B_0^3 + \dots = \frac{B_0}{1 - B_0} \quad (18)$$

따라서 DCF 방식에서 모든 패킷에 대한 평균지연 시간은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$E_K[D] = \frac{T_{wait} + ST_s}{1 + S} \quad (19)$$

### 3. 시뮬레이션 및 성능 평가

2절에서 설명한 4가지 모델에 대한 해석적인 결과를 분석하였으며, 이를 시뮬레이션을 수행한 결과와 비교하였다. 시뮬레이션은 SLAM II을 사용해서 Event-Driven 방식으로 구현하였다[10].

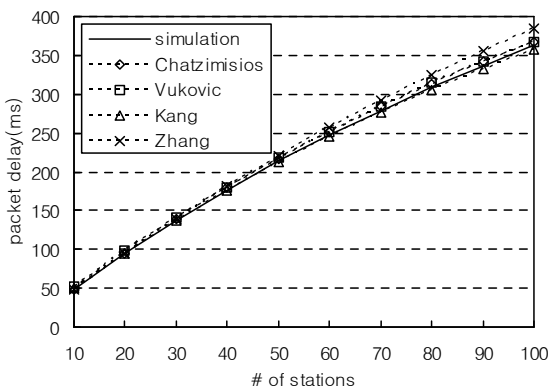
시뮬레이션 수행에 필요한 파라미터는 IEEE 802.11 표준규격 DSSS(Digital Sequence Spread Spectrum)를 가정하였으며, <표 1>과 같다[1]. 패킷 Payload 크기를 8184bit로 고정하였고 채널 속도는 2Mbps로 가정하였다. 또한 시뮬레이션을 위해 CW의 최소값( $CW_{min}$ )과 최대값( $CW_{max}$ )은 각각 32, 1024로 하고 재전송 한계값을 7로 설정하였다. 시뮬레이션 환경은 각 스테이션이 항상 전송할 데이터를 가지고 있는 포화상태를 가정하였으며, 전송에러에 의한 재전송은 고려하지 않았다.

[표 1] 시스템 파라미터(802.11 DSSS)

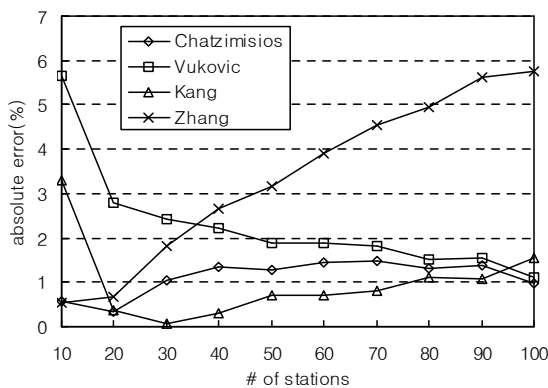
파라미터	값
Packet payload	8184 bits
MAC overhead	272 bits
PHY header	128 bits
ACK	112bit+PHYhdr
RTS	160bit+PHYhdr
CTS	112bit+PHYhdr
Channel bit rate	2 Mbps
Propagation Delay	1 $\mu$ s
Slot Time	20 $\mu$ s
SIFS	10 $\mu$ s
DIFS	50 $\mu$ s
$CW_{min}$	32
$CW_{max}$	1024
Short Retry Limit	7

[그림 1]은 RTS/CTS 액세스인 경우 스테이션의 수의 증가에 따른 평균 패킷지연시간(Average Packet Delay)을 2절에서 설명한 4가지 알고리즘을 시뮬레이션 결과와 비교하여 나타낸 그래프이다. 스테이션 수가 증가함에 따라 충돌확률이 증가하므로 지연시간도 증가하는 것을 알 수 있다.

시뮬레이션 결과와 4가지 방식간의 차이점을 분명하게 보이기 위해 [그림 2]에는 시뮬레이션결과와 각 방식간의 절대오차를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 스테이션 수가 증가함에 따라 상대오차도 증가함을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과와 가장 잘 일치하는 방식의 순서는 Kang 모델, Chatzimisios 모델, Vukovic 모델, Zhang 모델이다. 스테이션 수가 100일 때, Kang 모델은 2.3% 정도의 오차를 보이며, Zhang 모델은 약 9.5% 정도가 됨을 알 수 있다. Kang 모델은 스테이션의 개수가 10인 경우를 제외하고 시뮬레이션 결과와 가장 잘 일치되는 것으로 분석된다.



[그림 1] 평균 패킷지연시간(RTS/CTS 액세스)



[그림 2] 절대오차(RTS/CTS 액세스)

4. 결 론

본 논문에서는 패킷지연에 관해 현재까지 해석적으로 연구된 결과들을 비교 분석하였으며, 이를 시뮬레이션을 이용하여 검증하였다. 분석 결과 Kang 모델이 가장 우수한 것으로 분석되었으며, 그 다음에는 Chatzimisios 모델, Vukovic 모델, Zhang 모델 순이었다.

평균 패킷지연시간은 패킷이 큐의 헤더에 입력되는 순간부터 패킷이 성공적으로 전송되어 수신측으로부터 ACK 메시지를 수신할 때까지의 시간으로 정의된다. 패킷지연시간에 영향을 미치는 요인으로 크게 두 가지가 있다. 첫 번째는 패킷전송에 성공할 때까지 재전송을 시도하며 이에 기인한 지연이다. IEEE 802.11 표준에서는 재전송에 의해서 지연시간이 지나치게 길어지는 경우를 제한하기 위해 재전송 횟수를 7로 한정하였으며, 그 이상의 패킷 재전송이 발생하면 그 패킷은 폐기한다. 두 번째 지연요인은 Backoff 과정을 거치면서 발생하는 경우이다. 이와 같은 지연요소를 가장 잘 수학적으로 모델링한 모델은 Kang 모델과 Chatzimisios 모델인 것으로 분석되었다.

본 연구 결과를 바탕으로 향후 진행할 연구과제로는 다양한 형태의 트래픽이 공존하는 멀티미디어 환경에서 각 트래픽 특성별 지연시간에 관한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] IEEE standard for Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, IEEE Std: 802.11b-1999/Cor 1-2001, 2001.
- [2] G. Bianchi, "Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function", IEEE J. Selected Areas in Communications, Vol. 18, No. 3, pp. 535-547, 2000.
- [3] Y. Xiao, J. Rosdahl, "Throughput and Delay Limits of IEEE 802.11," IEEE Communication Letters. Vol. 6, No 8, pp. 355-357, Aug. 2002.
- [4] H. Wu, Y. Peng, K. Long, S. Cheng, J. Ma, "Performance of Reliable Transport Protocol over IEEE 802.11 Wireless LAN: Analysis and Enhancement", Proc. of IEEE INFOCOM, pp. 599-607, June 2002.
- [5] P. Chatzimisios, A. C. Boucouvalas and

- V.Vitsas, "IEEE 802.11 Packet Delay - A Finite Retry Limit Analysis", IEEE GLOBECOM, vol. 2, pp. 950-954, Dec. 2003.
- [6] I. Vukovic and N. Smavatkul, "Delay Analysis of Different Backoff Algorithms in IEEE 802.11", Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), Los Angeles CA, Sept. 2004.
- [7] L. Zhang, Y. Shu, O. Yang, G. Wang, "Study of Medium Access Delay in IEEE 802.11 Wireless Networks", IEICE Transactions on Communications, Vol. E89-B, No. 4, pp. 1284-1293, April 2006.
- [8] K. Kang and X. Lin, "An Accurate MAC Delay Model for IEEE 802.11 DCF", Proc. of IEEE ICT, pp. 654-657, May 2007.
- [9] Li Yun, Long Ke-Ping, Zhao Wei-Liang and Wang Chong-Gang, "Analyzing the channel access delay of IEEE 802.11 DCF", Proc. of IEEE GLOBECOM '05, Vol. 5, pp. 2997-3001, Dec. 2005.
- [10] A. Alan B. Pritsker, "Introduction to Simulation and SLAM II", John Wiley & Sons, 1986.