

시변 패킷 기반 무선 링크에서 정지-대기 ARQ 기반 메시지의 지연 시간 분석

정희원 정명순*, 박홍성**

Delay Analysis of a Message based on the Stop-and-Wait ARQ in a Time-Varying Radio Link

Myoung Soon Jeong*, Hong Seong Park** *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 시변 패킷 기반 무선 링크에서 메시지와 패킷의 전송 지연 시간을 분석하였다. 메시지는 베르누이(Bernoulli) 프로세스에 따라 도착하고 생성되는 메시지의 길이는 지수 분포를 가진다고 가정하였다. 또한 시간 변이성을 가지는 무선 링크의 특성을 반영하기 위하여 2-상태 마코프 모델을 사용하여 해석하였다. 이 마코프 모델로부터, 패킷의 도착율과 패킷 전송 서비스 시간, 무선 링크의 평균 PER(packet error rate)의 향으로 패킷의 평균 전송 지연 시간과 평균 큐 길이를 해석적으로 분석하였고, 이러한 패킷의 성능 지표들로부터 메시지의 전송 지연 시간 및 큐 길이를 유도하였다. 수치적 결과로부터 시변 패킷 기반 무선 링크의 안정적 동작과 전송 성능을 보장하기 위해서는 PER에 따라 메시지 도착율 및 길이가 제한되어야 한다는 것을 알 수 있었다. 또한 성능에는 각 상태의 머무는 시간보다 PER의 영향이 큼을 알 수 있었다.

Key Words : Message Transmission delay; Packet Transmission Delay; Markov Model; PER.

ABSTRACT

This paper analyzes transmission delays of a message and a packet in a time-varying and packet-based radio link. The paper assumes that the arrivals of messages have a Bernoulli process and the lengths of the messages a exponential distribution. To reflect the feature of the time-varying radio link, we use a two-state Markov model. From the model the mean transmission delay of and the mean queue length of the packet are analyzed in terms of the packet distribution function, the packet transmission service time, and the PER of the radio link. And the mean message transmission delay time and the mean queue length are derived using the performance indices of the packet. Numerical results show that the message arrival rate and the message length have some bounds to keep the transmission of the message steady and to improve the performance indices of the message. It can be known that the PER of the state influences on the performance indices more than the sojourn time of the state.

I. 서론

IMT2000, 802.11 WLAN(wireless local area network), 블루투스(Bluetooth) 등으로 지원되는 무

선 네트워크는 편리한 단말기 이동성의 제공으로 사용이 증가하고 있다. 하지만 무선 네트워크는 단 한 개의 패킷 전송에도 많은 에러가 발생할 수 있는 에러에 대하여 열악한 조건이다. 무선 네트워크에서 발생하는 에러는 단말기의 이동, 두 단말기 사

* 강원대학교 전기전자정보통신공학부 BK21(msjeong@cc.kangwon.ac.kr), ** 강원대학교 전기전자정보통신공학부 (hspark@cc.kangwon.ac.kr)

논문번호 : #030209-0517, 접수일자 : 2003년 5월 17일

※본 연구는 MOCIE, ITEP, BK21 지원으로 수행되었습니다.

이에 장애물, 상대방 단말기로부터의 간섭 등이 원인으로 이동 단말기 사이에는 계속해서 에러 조건이 변화하는 시변 무선 링크가 설정된다.

무선 링크를 통한 데이터의 전송에 신뢰성을 높이기 위하여 다양한 에러 제어 방법이 제안되어 사용되고 있다. 가장 일반적인 방법은 ARQ(automatic repeat request), FEC(forward error correction) 등이고 두 방법을 결합한 하이브리드(hybrid) 방법도 있다. ARQ는 송신기가 정보 비트와 에러 감지 코드로 구성된 패킷을 전송하면 수신기는 해당 패킷을 수신 받은 후에 에러 감지 코드를 검사한다. 만약 에러가 감지되지 않으면 수신기는 패킷을 받아들이고 송신기로 ACK(Positive Acknowledgement)를 보내지만 에러가 감지되면 패킷을 버리고 송신기로 NAK(Negative Acknowledgement)을 보낸다. 송신기는 ACK가 수신되면 새로운 패킷을 보내고 NAK을 수신하면 패킷을 재전송한다. 따라서 에러가 많은 무선 링크 조건에서 ARQ를 이용하여 패킷을 전송하면 전송의 신뢰성은 높일 수 있지만 재전송의 반복으로 인하여 전송 지연 시간이 증가하는 단점이 있다. 이러한 ARQ는 SW(stop-and-wait) ARQ, GBN(go-back-N) ARQ, SR(selective repeat) ARQ 등의 변형이 사용되기도 한다. SW ARQ는 송신기가 다음 패킷을 보내기 전에 직전 패킷에 대한 ACK를 받아야 한다. GBN ARQ에서는 송신기가 ACK/NAK을 기다리지 않고 패킷을 연속적으로 보낼 수 있지만 특정 패킷에 대한 NAK을 수신하면 해당 패킷과 연속된 모든 패킷을 재전송한다. SR ARQ는 GBN ARQ처럼 송신기가 ACK/NAK을 기다리지 않고 패킷을 연속적으로 보내지만, NAK을 수신하면 해당 패킷만 재전송한다.

무선 링크에서의 전송 지연 시간에 대한 연구도 활발히 이루어져 왔다. [1]에서는 재생(renewal) 도착 프로세스와 안정된 무선 링크(stationary radio link)를 가정하고 패킷 지연 시간과 큐 길이의 분포 함수를 구하였다. [2]에서는 베르누이 도착 프로세스와 시불변(non time-varying) 무선 링크에서의 패킷 전송 지연 시간을 구하였다. [3]에서는 베르누이 도착 프로세스와 시변 무선 링크에서 이상적(ideal) SR ARQ로 전송되는 패킷의 전송 지연 시간이 구해졌다. [4]에서는 N-상태 마코프 도착 프로세스와 시변 무선 링크에서 이상적 SR ARQ 방법으로 전송되는 패킷의 전송 지연 시간을 구하였다. [7-10]에서는 패킷 네트워크에서의 메시지 전송 지연 시간을 다양한 방법으로 구하였다. 이러한 연구들 중

에서 [1-4]는 패킷의 전송 지연 시간을 구하는데 초점을 맞추고 있고 [7-10]는 메시지의 전송 지연 시간을 구하지만 에러가 없는 링크를 가정하여 구하였기 때문에 무선 링크의 시변 특성을 반영하지 못하는 문제점이 있다.

한편 무선 링크를 통하여 데이터 전송하려는 사용자의 입장에서는 개별 패킷의 전송 지연 시간보다는 메시지의 전송 지연 시간을 아는 것이 필요하다. 왜냐하면 사용자가 이용하는 응용 프로그램에서 이루어지는 대부분의 QoS 협상 등에서는 메시지 전송의 단대 단(end-to-end) 전송 성능을 사용하기 때문이다. 다시 말하자면, 사용자의 입장에서는 패킷보다는 사용자가 보내는 메시지의 전송 지연 시간이 더욱 가치가 있다.

본 논문에서는 실제 환경에서 2개의 단말기간 혹은 기지국과 단말기간 패킷 단위로 교환되는 패킷 기반 무선 링크와 가까운 조건에서, 혹은 시변 패킷 기반 무선 링크에서 메시지의 전송 지연 시간을 분석한다. 메시지는 베르누이(Bernoulli) 프로세스에 따라 도착하고 생성되는 메시지의 길이는 평균 L 바이트의 지수 분포를 가진다고 가정하여, 패킷의 도착 분포 및 패킷의 도착율을 유도한다. 해석적으로 성능 분석을 하기 위하여 시변 에러 특성을 반영하는 2-상태 마코프 모델로 시변 무선 링크를 모델링하여, 패킷의 도착율과 패킷 전송 서비스 시간, 무선 링크의 평균 PER의 향으로 패킷의 평균 전송 지연 시간과 패킷의 평균 큐 길이를 구한다. 메시지는 여러 개의 패킷이 결합된 것이므로 패킷 평균 전송 지연 시간과 패킷의 평균 큐 길이로부터 메시지 전송 지연 시간을 유도한다.

본 논문의 구성은 서론에 이어 2장에 무선 링크 및 전송 모델을 소개하였다. 3장에는 패킷 전송 지연 시간과 메시지 전송 지연 시간을 구하기 위한 과정을 보이고 4장에 수치적 분석의 결과를 보였다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. 무선 링크 및 전송 모델

무선 링크는 장애물이나 이동체에 전송 신호의 반사 및 굴절로 인한 다중 경로 페이딩, 상대방 단말기와의 신호 간섭 등으로 시간에 따라 계속해서 변화하는 시변 에러 환경을 가진다. 시변 무선 링크의 모델링에는 그림 1의 2-상태 마코프 모델이 주로 사용된다[3,4,6]. 그림 1에서 상태 Good은 링크

에 에러가 거의 없는 상태이고 상태 Bad는 링크 상에 에러가 많아서 올바른 패킷을 수신하는 것이 어려운 상태이다. 상태 Good의 BER (Bit Error Rate, BER)을 b_g 로 상태 Bad의 BER을 b_b 라 하면 $b_g < b_b$ 의 관계를 가정할 수 있다. 또한 그림 1의 무선 링크는 데이터의 전송을 위하여 슬롯 구간, τ 로 분할되고 각 패킷의 전송 시간도 τ 로 가정하였다.

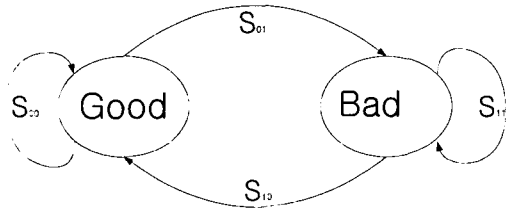


그림 1. 무선 링크 모델

여기서 $s_{i,j}$ ($i, j=0, 1$)는 링크가 상태 i 에서 상태 j 로 천이하는 확률이다. 링크 상태 사이의 천이는 슬롯의 끝에서 확률 s_{01} 과 s_{10} 으로 발생하는 것으로 가정하였다[3,4]. 그림 1의 무선 링크 모델과 가정을 기초로 평균 BER과 Bad 상태에 있을 확률을 구하면 다음과 같다. 먼저 평균 BER, b_m 은 식(1)과 같다.

$$b_m = \frac{s_{10}b_g + s_{01}b_b}{s_{10} + s_{01}} \quad (1)$$

다음으로 무선 링크가 Bad 상태에 있을 평형 상태 (equilibrium) 확률, π_1 과 Good 상태에 있을 평형 상태 확률, π_0 는 다음과 같다.

$$\pi_1 = \frac{s_{01}}{s_{10} + s_{01}}, \quad (2)$$

$$\pi_0 = \frac{s_{10}}{s_{10} + s_{01}}. \quad (3)$$

Good 상태와 Bad 상태에 있을 때 패킷 에러율을 각각 e_0 , e_1 이라 하고 평균 패킷 에러율, e_m 을 정의하면 다음과 같다.

$$e_m = \frac{s_{10}e_0 + s_{01}e_1}{s_{10} + s_{01}} \quad (4)$$

일반적으로 패킷 에러율은 전송 패킷의 길이, 적용된 에러 정정 코딩 방법 등에 따라 달라질 수 있다. 예를 들어, e_0 와 e_1 을 에러 정정 코딩이 사용되지 않은 L 비트의 패킷에 대하여 정의하면 각각 다음과 같다.

$$e_0 = 1 - (1 - b_g)^L \quad (5)$$

$$e_1 = 1 - (1 - b_b)^L \quad (6)$$

실제로 블루투스에서는 유료 부하(payload) 부분에 에러 정정 코드를 사용하지 않는 DH와 에러 정정 코딩 방법으로 유료부하에 2/3 FEC를 사용하는 DM 패킷이 있다. 이들 2 종류의 패킷은 모두 헤더에 1/3 FEC을 사용한다. DM 패킷 종류에 대한 Good 상태의 PER, e_0 과 Bad 상태의 PER, e_1 이 (7.1)과 (7.2)에 표시되어 있으며, 유료부하 L 비트를 가진 DH 패킷에 대한 각 상태의 PER, e_0 와 e_1 이 각각 (8.1)과 (8.2)에 있다.

$$e_0 = 1 - \left[\sum_{x=0}^1 \binom{3}{x} b_g^x (1 - b_g)^{3-x} \right]^{42} \cdot \left[\sum_{x=0}^1 \binom{15}{x} b_g^x (1 - b_g)^{15-x} \right]^{\lceil \frac{L}{10} \rceil} \quad \text{for DM packet (7.1)}$$

$$e_1 = 1 - \left[\sum_{x=0}^1 \binom{3}{x} b_b^x (1 - b_b)^{3-x} \right]^{42} \cdot \left[\sum_{x=0}^1 \binom{15}{x} b_b^x (1 - b_b)^{15-x} \right]^{\lceil \frac{L}{10} \rceil} \quad \text{for DM packet (7.2)}$$

$$e_0 = 1 - \left[\sum_{x=0}^1 \binom{3}{x} b_g^x (1 - b_g)^{3-x} \right]^{42} \cdot (1 - b_g)^L \quad \text{for DH packet (8.1)}$$

$$e_1 = 1 - \left[\sum_{x=0}^1 \binom{3}{x} b_b^x (1 - b_b)^{3-x} \right]^{42} \cdot (1 - b_b)^L \quad \text{for DH packet(8.2)}$$

(7)-(8)을 사용하여 블루투스에서 에러 정정 코딩이 사용된 경우와 그렇지 않을 때의 e_0 와 e_1 를 비교할 수 있다. 이를 위하여 전송 패킷의 유료부하가 17바이트를 사용하고 무선 링크의 b_g 와 b_b 가 각각

0.0001과 0.01이라고 가정한다. 유효부하부분에 에러 정정코딩을 사용하지 않은 DH의 e_0 와 e_1 는 각각 0.01587, 0.8022이고 에러 정정 코딩이 사용된 DM 패킷의 e_0 와 e_1 는 0.001789과 0.1541이다. 따라서 e_0 와 e_1 에 절대적인 영향을 받는 PER을 낮추기 위해서는 에러 정정 코딩의 사용이 필요한 것을 알 수 있다. 하지만 에러 정정 코딩의 사용은 전송 패킷에 추가되는 잉여 비트 때문에 전송 효율이 감소하는 단점이 있다. 이러한 전송 효율의 감소를 적게 하는방법으로는 링크가 Good 상태인 경우에 전송 패킷에 에러 정정코딩을 적용하지 않고 Bad 상태인 경우에는 에러 정정 코딩을 적용하는 선택적인 전송 방법의 사용이 가능하다. 또한 PER이 높은 무선 링크의 경우에는 에러 정정 코드를 사용한 패킷을 전송하여도 에러의 발생이 많을 수 있다. 이러한 경우에는 전송 패킷의 길이를 짧게 하여 전송하면 에러를 줄일 수 있다[11].

III. 패킷 전송 지연 시간과 메시지 전송 지연 시간

본 논문에서는 메시지의 도착 모델은 비율 λ 인 Bernoulli 프로세스를 사용하였다. 또한 메시지의 길이는 평균 길이가 L 인 지수 분포라고 가정하였다. 일반적으로 메시지는 무선 링크에서 패킷 단위로 전송된다. 본 논문에서는 전송 패킷의 최대 크기를 L_p 라 하였다. 따라서 길이 L_1 인 메시지는 $\lceil L_1/L_p \rceil$ 개의 패킷으로 구성된 것이다. 한 개의 패킷을 전송하는 평균 시간과 슬롯의 크기는 같은 것으로 가정하였다. 직전에 전송한 패킷에 대한 NAK이 같은 슬롯 안에 도착하지 않았다면, 새로운 패킷이 슬롯의 시작시 전송된다. 전송 패킷은 재전송을 위하여 송신기의 버퍼에 저장되어 있다가 ACK가 오면 버퍼로부터 제거되고 NAK이 오면 재전송된다.

해석의 단순화를 위하여 패킷 전송의 과정에 다음의 가정을 사용하였다.

- 메시지 저장 버퍼(큐)와 패킷 재전송 버퍼(큐)의 크기는 무한하다.
- 버퍼 내의 패킷의 전송에는 선입선출 방식을 사용한다.

- ACK/NAK은 에러 없이 전송된다.
- 최대 한 개의 패킷만이 한 슬롯 구간에서 전송된다.
- 버퍼에 있는 패킷의 수는 ACK/NACK 패킷의 도착과 새로운 메시지의 도착한 후 바로 시작하는 슬롯에서 측정한다.

성능 해석에 사용된 기호의 정의는 다음과 같다.

$q_j(k)$: k번 째 슬롯 구간의 시작에서 링크 상태 j 인 큐의 길이. 채널 상태 0 혹은 1은 각각 Good 상태 혹은 Bad 상태를 의미한다.

$S_{i,j}(k)$: k번 째 슬롯시 링크 상태 i 에서 (k+1)번 째 슬롯 구간에서 링크 상태 j 로 천이 확률

$a(k)$: k번 째 슬롯 구간에 도착하는 새로운 패킷의 개수

$p_m(k)$: $p_a(k) = m$ 즉, k번 째 슬롯 구간에 도착하는 새로운 패킷의 수가 m 일 확률

$e_j(k)$: k번 째 슬롯 구간에 상태 j 인 링크의 패킷 에러 확률

(k+1)번 째 슬롯에서 큐 길이는 k번 째 슬롯의 큐 길이와 새로운 메시지의 도착(혹은 새로운 패킷의 개수)와 ACK/NAK의 종류에 따라 달라진다. (k+1)번 째 슬롯이 시작될 때에 큐의 길이를 구하면 다음과 같다.

$q_j(k) > 0$ 에 대해서는 (9)의 관계가, $q_j(k) = 0$ 에 대해서는 (10)의 관계가 성립한다.

$$q_j(k+1) = \begin{cases} q_j(k) + n - 1 & \text{with } p_n(k)(1 - e_j(k))S_{j,j}(k) \\ q_j(k) + n & \text{with } p_n(k)e_j(k)S_{j,j}(k) \\ q_{1-j}(k) + n - 1 & \text{with } p_n(k)(1 - e_{1-j}(k))S_{1-j,j}(k) \\ q_{1-j}(k) + n - 1 & \text{with } p_n(k)e_{1-j}(k)S_{1-j,j}(k) \end{cases} \quad \text{if } q_j(k) > 0 \quad (9)$$

$$q_j(k+1) = n \quad \text{with } p_n(k)(S_{j,j}(k) + S_{1-j,j}(k)) \quad \text{if } q_j(k) = 0 \quad (10)$$

베르누이 프로세스를 이용하여 메시지의 도착을 가정하므로 한 슬롯 구간, τ 동안에 메시지의 도착이 하나도 없을 확률은 λ 이고 한 개의 메시지가 도착할 확률은 $1 - \lambda$ 가 된다. 여기서 메시지가 도착하지 않는 경우는 패킷이 도착하지 않는 경우와 동일하

고, 길이 L_1 인 메시지가 도착하면 $\lceil L_1/L_p \rceil$ 개의 패킷이 동시에 도착하는 것과 동일한 것으로 생각할 수 있다. 따라서 메시지의 도착에 따른 패킷 수들의 도착 확률은 다음과 같이 구할 수 있다. N 을 패킷 수에 대한 확률 변수라고 하자. $0 < L_1 \leq L_p$ 이면 메시지는 한 개의 패킷만을 가진다. 또한 $(n-1)L_p < L_1 \leq nL_p$ 이면 메시지는 n 개의 패킷으로 구성된다. 따라서, 메시지가 m 개의 패킷으로 구성될 확률, $PN=m$ 은 (11)과 같다.

$$PN=m = \begin{cases} 1-\lambda & \text{if } m=0 \\ \lambda e^{-mL_p/L} (e^{L_p/L} - 1) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

$A(z)$ 를 도착하는 패킷의 수에 대한 확률 생성 함수(Probability Generating Function, PGF)라 하면, (12)와 같이 구할 수 있다[5].

$$A(z) = \sum_{i=0}^{\infty} P(N=i)z^i \\ = (1-\lambda) + \lambda(1 - e^{-L_p/L})z / (1 - e^{L_p/L}z) \quad (12)$$

(12)가 성립하려면 $|z| < e^{L_p/L}$ 이어야 한다. 또한 패킷의 평균 도착율, λ_p 을 (12)의 PGF를 사용하여 구하면 (13)과 같이 구할 수 있다.

$$\lambda_p = \frac{dA(1)}{dz} = \frac{\lambda}{(1 - e^{-L_p/L})} \quad (13)$$

안정 상태(steady state)를 가정하면 (9)와 (10)와 PGF의 정의들을 사용하여 상태 j 인 큐 길이에 대한 PGF, $Q_j(z)$ 를 (14)와 (15)로 구할 수 있다[3].

$$Q_0(z)(z - S_{0,0}A(z)\Psi_0(z)) \\ = S_{1,0}A(z)\Psi_1(z)Q_1(z) + (z - \Psi_0(z))TA(z) \\ \cdot q_0[0]S_{0,0} + A(z)q_1[0]S_{1,0}(z - \Psi_1(z)) \quad (14)$$

$$Q_1(z)(z - S_{1,1}A(z)\Psi_1(z)) \\ = S_{0,1}A(z)\Psi_0(z)Q_0(z) + (z - \Psi_1(z))A(z) \\ \cdot q_1[0]S_{1,1} + A(z)q_0[0]S_{0,1}(z - \Psi_0(z)) \quad (15)$$

여기서, $\Psi_i(Z) = e_i z + 1 - e_i$ ($i=0,1$)이며 $q_i[0]$ 는 상태 i 인 큐가 비어있을 평형 확률(equilibrium probability)을 의미한다. (14)와 (15)를 사용하여 평형 상태의 큐 길이 분포에 대한 PGF, $Q(Z)$ 는 (16)과 같이 표현할 수 있다[3].

$$Q(Z) = Q_0(Z) + Q_1(Z) \quad (16)$$

(14)와(15)로부터 (17)을 구할 수 있다.

$$Q_i(Z) = N_i(Z)/D(Z) \quad (17)$$

여기서, $D(Z)$, $N_0(Z)$ 와 $N_1(Z)$ 는 다음과 같다.

$$D(z) = z^2 - [s_{0,0}\psi_0(z) + s_{1,1}\psi_1(z)]zA(z) \\ + (s_{0,0}s_{1,1} - s_{1,0}s_{0,1})\psi_1(z)\psi_0(z)A^2(z),$$

$$N_0(z) = [s_{0,0}z + (s_{0,1}s_{1,0} - s_{0,0}s_{1,1})A(z)\psi_1(z)] \\ [z - \psi_0(z)]A(z)q_0[0] \\ + s_{1,0}z[z - \psi_1(z)]A(z)q_1[0],$$

$$N_1(z) = s_{0,1}z[z - \psi_0(z)]A(z)q_0[0] + [s_{1,1}z \\ + (s_{0,1}s_{1,0} - s_{0,0}s_{1,1})A(z)\psi_0(z)] \\ \cdot [z - \psi_1(z)]A(z)q_1[0].$$

따라서, 전송 큐에 기다리고 있는 패킷의 평균 개수, \bar{q} 는 (18)과 같다.

$$\bar{q} = Q'(1) = Q'_0(1) + Q'_1(1) \quad (18)$$

여기서, $f(\cdot)$ 는 $f(\cdot)$ 의 일차 미분함수를 의미한다. 또한 $Q(Z)$ 는 (19)로 표현된다.

$$Q(Z) = N(Z)/D(Z). \quad (19)$$

여기서, $D(z)$ 는 (17)과 같으며 $N(z)$ 는 다음과 같다.

$$N(z) = N_1(z) + N_2(z) = [z + (s_{0,1}s_{1,0} - s_{0,0}s_{1,1})A(z)\psi_1(z)][z - \psi_0(z)]A(z)q_0[0] + [z + (s_{0,1}s_{1,0} - s_{0,0}s_{1,1})\psi_0(z)A(z)][z - \psi_1(z)] \cdot A(z)q_1[0].$$

다음으로 $q_1[0]$ 와 $q_2[0]$ 를 구해야 한다. PGF의 정의로부터

$$\lim_{Z \rightarrow 1} Q(Z) = 1$$

가 성립한다. 이를 풀면 (20)을 얻을 수 있다.

$$\frac{s_{0,1} + s_{1,0} - s_{0,1}e_1 - s_{1,0}e_0 - (s_{0,1} + s_{1,0})\lambda_p}{(s_{0,1} + s_{1,0})(1 - e_0)q_0[0] + (1 - e_1)q_1[0]} \quad (20)$$

$Q(Z)$ 가 $|Z| < e^{L/L}$ 가 만족되는 임의의 Z_0 에서 해석 가능하기 때문에 Rouché 정리를 사용하여 (21)과 (22)를 얻을 수 있다.

$$[S_{0,0}Z_0 + (S_{0,1}S_{1,0} - S_{0,0}S_{1,1})A(Z_0)\Psi_1(Z_0)A(Z_0) \cdot q_0[0] + S_{1,0}Z_0[Z_0 - \Psi_1(Z_0)]A(Z_0)q_1[0]] = 0 \quad (21)$$

$$[Z_0 + (S_{0,1}S_{1,0} - S_{0,0}S_{1,1})\Psi_1(Z_0)A(Z_0)][Z_0 - \Psi_0(Z_0)]A(Z_0)q_0[0] + [Z_0 + (S_{0,1}S_{1,0} - S_{0,0}S_{1,1}) \cdot \Psi_0(Z_0)A(Z_0)][Z_0 - \Psi_1(Z_0)]A(Z_0)q_1[0] = 0 \quad (22)$$

(20)-(22)를 이용하여 $q_1[0]$ 과 $q_2[0]$ 의 값을 구할 수 있다. $q_1[0]$ 과 $q_2[0]$ 의 값들을 사용하여 큐에 있는 평균 패킷의 개수 혹은 평균 큐 길이를 (18)로부터 얻을 수 있다.

\bar{n} 를 바르게 수신된 패킷당 평균 전송 시도 횟수라 정의하면, (23) [6, Kalle]을 이용할 수 있다.

$$\bar{n} = 1 + \vec{i}_1(\vec{i}_2 - \vec{i})^{-1}\vec{v} \quad (23)$$

여기서, $\vec{i}_1 = [1 \ 1]$ 이고 \vec{i}_2 는 2x2 아이덴티티(identity) 행렬이다. 행렬 \vec{s} 와 행렬 \vec{v} 는 다음과 같다:

$$\vec{i} = \begin{bmatrix} S_{0,0}(t)e_0 & S_{1,0}(t)e_0 \\ S_{0,1}(t)e_1 & S_{1,1}(t)e_1 \end{bmatrix},$$

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} \pi_0 e_0 \\ \pi_1 e_1 \end{bmatrix}.$$

여기서, $S_{i,j}(t)$ 는 링크 상태 i 에서 상태 j 로 천이 하는 t 단계 천이 확률로 정의한다.

Little의 공식을 사용하여 패킷에 대한 큐에서의 평균 대기 시간, \bar{d} 는 (24)와 같이 구할 수 있다.

$$\bar{d} = \bar{q} / \lambda_p \quad (24)$$

참고로, 패킷에 대한 큐에서의 평균 대기 시간 \bar{d} 는 슬롯 구간, τ 로 정규화한 것이다. 이는 λ_p 가 τ 에 대하여 고려된 것이기 때문이다.

패킷의 전송 지연 시간, T_p 는 패킷의 큐에서의 평균 대기 시간과 실제 패킷을 성공적으로 전송할 때까지의 시간의 합이다. 따라서 T_p 는 (25)로 정의할 수 있다.

$$\overline{T_p} = \bar{d} + \tau \bar{n} \quad (25)$$

(25)와 Little의 공식을 사용하면 실제 전송큐에서 대기 중인 패킷의 평균 개수, $\overline{Q_p}$ 를 (26)으로 구할 수 있다.

$$\overline{Q_p} = \bar{q} + \lambda_p \tau \bar{n} \quad (26)$$

$\overline{Q_p}$ 와 \bar{q} 의 차이는 $\overline{Q_p}$ 가 패킷 전송을 시작하여 상대방에게 성공적으로 전송될때까지의 시간 동안에 들어오는 패킷을 고려하였다는 것이다.

메시지의 길이가 L_1 일 때 해당 메시지로 만들어지는 패킷의 개수, N_p 는 $\lceil L_1/L_p \rceil$ 이다. 평균 L 인 지수 분포의 메시지를 구성하는 패킷 개수의 분포 PGF, $N_p(z)$ 는 (27)로 구할 수 있다.

$$N_p(z) = \sum_{i=0}^{\infty} P(N_p = i)Z^i = (1 - e^{-L_p/L})Z / (1 - e^{-L_p/L}Z) \quad (27)$$

따라서, N_p 의 평균, $\overline{N_p}$ 는 (28)과 같다.

$$\overline{N_p} = \frac{dN_p(1)}{dz} = \frac{1}{(1 - e^{-L_p/L})} \quad (28)$$

패킷 기반 무선 링크에서 평균 메시지 전송 지연 시간은 (25)의 평균 패킷 전송 지연 시간과 (28)의 $\overline{N_p}$ 을 사용하여 구할 수 있다[7]. 메시지 전송 지연 시간은 메시지의 첫 번째 패킷이 전송될 때부터 메시지의 마지막 패킷의 전송이 정상적으로 종료될 때까지이다. 즉, 평균 메시지 전송 지연 시간은 특정 패킷(여기서, 메시지의 첫 번째 패킷)의 평균 패킷 전송 지연 시간과 $(\overline{N_p} - 1)$ 개의 패킷 전송 시간을 합한 것이다. 따라서, 평균 L 인 지수 분포를 가지는 메시지의 $\overline{T_m}$ 은 (29)와 같다.

$$\overline{T_m} = \overline{T_p} + (\overline{N_p} - 1)\tau n \quad (29)$$

이는 메시지가 $\overline{N_p}$ 개의 패킷으로 구성되고 첫 번째 패킷이 임의의 시간 동안 대기한 후에 전송되면서 나머지 $(\overline{N_p} - 1)$ 개의 패킷도 계속해서 전송되기 때문이다. (29)에 Little의 공식을 적용하면 전송 큐에 대기하는 평균 메시지의 개수, $\overline{Q_m}$ 을 (30)으로 구할 수 있다.

$$\overline{Q_m} = \lambda \cdot \overline{T_m} = \lambda \overline{T_p} + \lambda \overline{N_p} \tau n \quad (30)$$

IV. 수치적 결과

다음에서는 해석의 단순화를 위하여 매개 변수 중에서 τ 를 패킷의 최대 크기, L_p 와 같다고 하고 1로 정규화하여 그림 2 ~ 그림 7의 결과를 구하였다. 여기서 전송 메시지의 길이는 평균 L 인 지수 분포를 가지고 메시지의 도착에는 비율 λ 인 베르누이 프로세스를 사용하였다.

그림 2와 그림 3은 다양한 평균 PER, e_m 에서 메시지 도착율에 대한 패킷 단위의 평균 큐 길이와 메시지 단위의 평균 큐 길이를 보인 것이다. e_m 이 10^{-4} 이상인 경우에는 평균 PER에 상관없이 동일한 평균 큐 길이를 보이며 메시지의 길이가 길수록 메시지의 도착율이 작은 곳에서 시스템이 안정 상태

로 동작하는 것을 볼 수 있다. 그림 2와 그림 3에서 $L = L_p, 11 \cdot L_p$ 의 메시지 도착율이 최대가 되는 곳은 각각 0.63과 0.085 근처로 이를 초과하는 곳에서 큐 길이가 지수적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉, 시스템이 불안정화 상태가 된다. 따라서 시스템의 안정화 동작을 보장하려면 메시지의 길이가 긴 곳에서는 메시지 도착율을 제한할 필요가 있음을 알 수 있다.

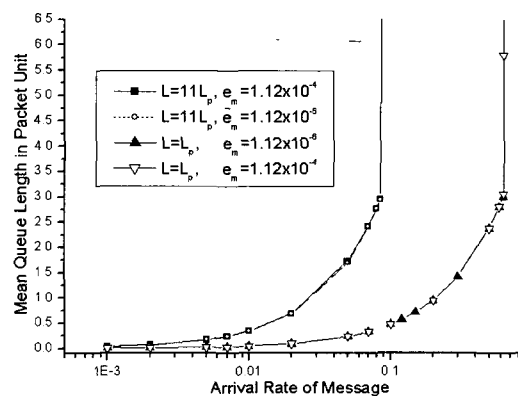


그림 2. 메시지 도착율에 따른 패킷의 평균 큐 길이($s01=0.1, s10=0.8$)

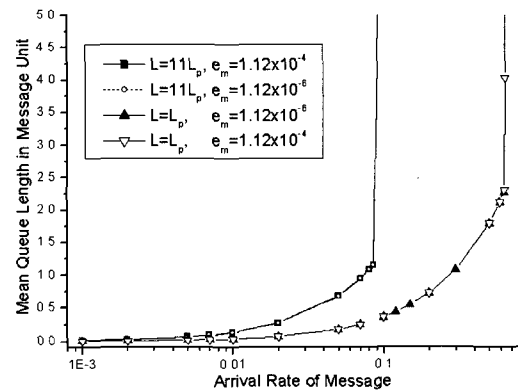


그림 3. 메시지 도착율에 따른 메시지의 평균 큐 길이 ($s01=0.1, s10=0.8$)

그림 4는 다양한 평균 PER e_m 에서 메시지 길이에 대한 정규화 메시지의 평균 전송 지연 시간 및 평균 패킷 지연 시간을 보인 것이다. 그림 5는 다양한 e_m 에서 메시지 단위의 평균 큐 길이와 패킷 단위의 평균 큐 길이를 보인 것이다. 그림 4와 그림 5에서 메시지 도착율, λ 는 0.07이다. 그림 4에서 평균 패킷 전송 지연 시간과 평균 메시지 전송 지연 시간은 평

균 PER의 범위가 $2.8 \times 10^{-3} \sim 1.12 \times 10^{-6}$ 인 곳에서는 변화가 거의 없다. 평균 패킷 전송 지연 시간은 메시지 길이가 증가하여도 $\lambda=0.07$ 에서 변화가 없는 것이다. 하지만 평균 메시지 전송 지연 시간은 메시지 길이에 비례하여 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 5에서는 메시지 길이의 증가에 따라서 큐 길이가 메시지 길이보다 빠르게 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 메시지 길이와 평균 PER의 증가에 따라서 평균 큐 길이가 3배 정도 증가하는 것을 볼 수 있다.

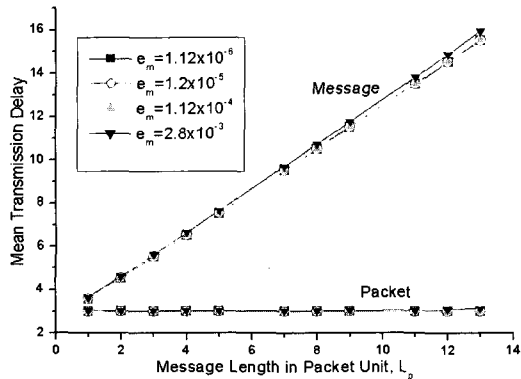


그림 4. 메시지 길이에 따른 정규화 평균 메시지 지연 시간 및 평균 패킷 지연 시간($s_{01}=0.1, s_{10}=0.8, \lambda=0.07$)

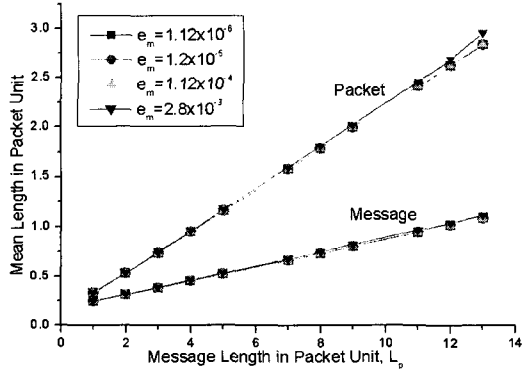


그림 5. 메시지 길이에 따른 메시지 단위의 평균 큐 길이 및 패킷 단위의 평균 큐 길이($s_{01}=0.1, s_{10}=0.8, \lambda=0.07$)

그림 6과 그림 7은 메시지 길이가 $6 \cdot L_p$ 일 때 Bad 상태와 Good 상태의 PER이 각각 다르지만 평균 PER e_m 은 같은 값을 가지도록 하는 조건 하에서 PER에 대한 평균 메시지 전송 지연 시간, 평균 패킷 전송 지연 시간, 메시지 단위의 평균 큐 길이, 패킷 단위의 평균 큐 길이를 보인 것이다. 즉, 그림 6과 그림 7에서 L1과 L2로 표시된 성능 지표들은 각각 $s_{10}=0.7, s_{01}=0.4$ 과 $s_{10}=0.8, s_{01}=0.1$ 를 나타낸 것이며,

L1과 L2의 Bad 상태의 PER 비가 약 1:3.28로 L2의 PER이 크다. L1과 L2의 Good 상태의 PER 비는 약 2:1로 L1의 PER이 크다. 하지만 L1과 L2는 동일한 평균 PER e_m 을 가진다. 그림 6과 그림 7에서 e_m 이 10^{-3} 이하일 때에는 메시지와 패킷에 대한 평균 전송 지연 시간과 큐 길이가 같지만, e_m 이 10^{-3} 이상이 되면 메시지의 경우 약 0.3 배 정도, 패킷의 경우 0.2배 정도 큐 길이보다 평균 전송 지연 시간이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과로부터 PER은 Good 상태보다는 Bad 상태에 더 많은 영향을 주는 것을 알 수 있다. 또한 e_m 이 10^{-2} 이하인 곳에서는 e_m 으로 성능을 표시하는 것은 무의미한 것을 알 수 있다. 또한 각 상태에 머무는 시간도 중요하지만 각 상태의 PER이 성능에 더 많은 영향을 주는 것을 알 수 있다.

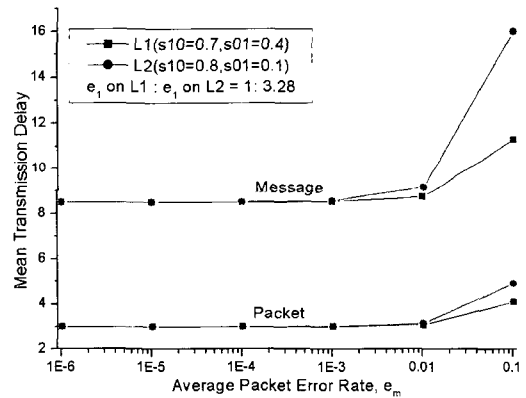


그림 6. 패킷 에러율에 대한 정규화 평균 메시지 전송 지연 시간 및 평균 패킷 전송 지연($s_{01}=0.1, s_{10}=0.8, \lambda=0.1, L=6L_p, e_0$ on L2 : e_0 on L2 = 2 : 1)

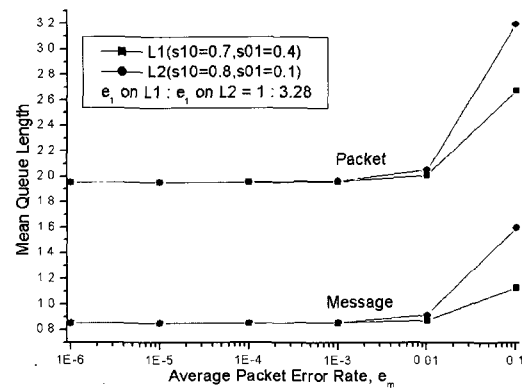


그림 7. 패킷 에러율에 대한 메시지 단위와 패킷 단위의 평균 큐 길이($s_{01}=0.1, s_{10}=0.8, \lambda=0.1, L=6L_p, e_0$ on L2 : e_0 on L2 = 2 : 1)

따라서 그림 6과 그림 7에서와 같이 평균 PER이 10^{-3} 이상인 경우에는 Bad 상태에서 상태 PER을 낮추어야만 패킷 및 메시지에 대한 전송 지연 시간과 큐 길이를 줄일 수 있다. 2장에서 언급한 것처럼 상태 PER을 낮추기 위해서는 여러 정정 코딩을 사용하거나 패킷의 길이를 짧게 해야 하지만 실제 전송 패킷의 개수를 증가시켜 메시지의 전송 지연 시간이 증가하게 하는 원인이 되므로 적절한 적용이 필요하다.

V. 결 론

본 논문에서는 시간 변이성을 가지는 패킷 기반무선 링크에서 메시지와 패킷의 전송 지연 시간을 분석하였다. 메시지의 도착은 베르누이(Bernoulli) 프로세스로, 메시지의 길이는 지수 분포로 가정하여, 패킷의 도착 분포함수를 유도하였다. 또한 시변 패킷 기반무선 링크에서 패킷의 전송 지연 시간을 해석적으로 분석하기 위하여, 상태 Good과 상태 Bad의 2-상태 마코프 모델을 사용하였다. 이 마코프 모델로부터 패킷의 도착율과 패킷 전송 서비스 시간, 평균 PER 등의 향으로 패킷의 평균 전송 지연 시간과 평균 큐 길이를 해석적으로 분석하였고, 이러한 패킷의 성능 지표들로부터 메시지의 전송 지연 시간 및 큐 길이를 유도하였다.

수치적 분석의 결과 패킷의 평균 PER, e_m 이 10^{-3} 이하인 경우에는 각 상태 PER이 전송 성능에 영향을 거의 주지 않지만 10^{-3} 이상이 되면 각 상태 PER이 전송 성능에 영향을 주기 시작하여 10^{-2} 이 되면 영향을 커지는 것을 관찰하였다. e_m 이 10^{-2} 이하인 경우에는 각 상태의 머무는 시간보다 상태 PER이 성능에 많은 영향을 주기 때문이다. 다시 말하자면 e_m 이 10^{-2} 이하인 경우에는 각 상태의 PER에 따라 전송 성능을 표시하는 것이 필요한 것을 알 수 있었다. 평균 PER이 높은 패킷 기반 무선 링크의 안정적 동작 및 전송 성능을 보장하기 위해서는 메시지의 도착율과 메시지의 길이를 적정한 범위로 제한해야 하고 여러정정 코딩 등의 사용이 필요함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] A. G. Konheim, "A queueing analysis of two ARQ protocols," IEEE Tr. Comm., vol. 28, pp. 1004-1014, Jul. 1980.
- [2] M.E. Anagnostou and E.N. Protonotarios, "Performance Analysis of the selective repeat ARQ protocol," IEEE Tr. Comm., vol.34, pp.127-135, Feb.1986.
- [3] R. Fantacci, "Queueing Analysis of the Selective Repeat Automatic Repeat Request Protocol Wireless Packet Networks," IEEE Tr Veh. Tech., vol.45, pp.258-264, May 1996.
- [4] J.G. Kim and M.M. Krunz, "Delay Analysis of Selective Repeat ARQ for a Markovian Source Over a Wireless Channel," IEEE Tr. Veh. Tech., vol. 49, pp.1968-1981, Sep. 2000.
- [5] L. Kleinrock, Queueing Systems, Vol. 1; Theory, Wisley, 1975.
- [6] S. Kalle, "Analysis of Memory and Incremental Redundancy ARQ scheme over a Nonstationary Channel," IEEE Tr. Comm., vol. 40, pp.1474-1480, Sep. 1992.
- [7] H. Bruneel, "Calculation of Message Delays and Message Waiting Times in Switching Elements with Slow Access Lines," IEEE Tr. on Communications, Vol. 42, No.2/3/4, pp. 255-259, Feb/Mar /Apr, 1994.
- [8] -, "Packet Delay and queue length for statistical multiplexers with low-speed access lines," Computer Networks and ISDN Systems, vol. 25, pp. 1267-1277, Jul. 1993.
- [9] J. N. Daigle, "Message Delays at Packet-Switching Nodes Serving Multiple Classes," IEEE Tr. on Communications, Vol. 38, No.4, pp. 447-455, Apr. 1990.
- [10] J. Chang and R. Chang, "The Behavior of a Finite Queue with Batch Poisson Inputs Resulting from Message Packetization and a Synchronous Server," IEEE Tr. on Communications, Vol. 32 No.12, pp. 1277-1285, Dec. 1984.
- [11] 박홍성, 정명순, "무선 링크에서의 블루투스 ACL 패킷의 성능 분석," 한국통신학회논문지, Vol.26 No.9A, pp.1465-1474, 2001.9.

정 명 순(Myoung Soon Jeong) 정회원



1989년 2월 : 강원대학교 전자
공학과 졸업
1992년 8월 : 강원대학교 전기
공학과 석사
1999년 2월 : 강원대학교 전자
공학과 박사
2001년 8월 ~ 현재 : 강원 대

학교 BK21 계약 교수

<주관심분야> 무선 데이터 통신공학

박 흥 성(Hong Seong Park) 정회원

현재 : 강원 제 28권 제 5B호 참조