

시변 블루투스 링크에서 메시지의 지연시간

Delay of a Message in a Time-Varying Bluetooth Link

정 명 순* 박 흥 성**
Jeong, Myoung-Soon Park, Hong-Seong

Abstract

Because the quality of a radio link in real environment is generally varied with time, there is a difference between the delay in the real environment and one obtained from the analytic model where a time-varying link model is not used as a link model for a Bluetooth. This paper analyzes the transmission delay of a message in the time-varying radio link model for the Bluetooth. The time-varying radio link is modeled with a two-state Markov model. The mean transmission delay of the message is analytically obtained in terms of the arrival rate of the message, the state transition probability in the Markov model, and the packet error rate.

키워드 블루투스, 무선 링크, 메시지 전송 지연
Keywords : *Bluetooth, radio link, message transmission delay*

1. 서론

최근에 블루투스(Bluetooth), WLAN, RF Home 등과 같은 다양한 근거리 무선 통신 프로토콜의 상용화가 이루어지면서 이들 통신 프로토콜이 제공하는 무선 링크를 통하여 전송되는 데이터의 전송 성능에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 데이터의 전송 지연 시간에 대한 연구가 활발한데 [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 중에서 [1-4]는 패킷의 전송 지연 시간을 구하는데 초점을 맞추고 있고 [7-10]는 메시지의 전송 지연 시간을 구하지만 예러가 없는 링크를 가정하여 구하였기 때문에 무선 링크의 시변 특성을 반영하지 못하는 문제점이 있다. [11]은 블루투스의 시불변 무선 링크에서의 메시지의 성능을 분석하여 여러 BER에서의 메시지의 전송 시간을 최소화하는 패킷의 최적 길이를 제시하였다. 그러나, 한 번 BER이 고정되면 변하지 않는다고 가정하였고 여러 때

* 강원대학교 BK21 교수, 공학박사
** 강원대학교 전기전자정보통신공학부 부교수, 공학박사

시지가 도착한다고 가정하지 않고 하나의 메시지에 대한 전송 시간을 구하였다.

본 논문에서는 시변 특성을 가진 패킷 기반 무선 링크를 통하여 전송되는 메시지의 전송 지연 시간을 분석하였다. 이를 위하여 메시지의 도착 모델로는 베르누이(Bernoulli) 프로세스를 사용하고 전송 메시지의 길이는 평균 L 바이트인 지수 분포로 가정하였다. 메시지의 길이 및 도착 모델로부터 패킷의 도착 분포 및 도착율을 유도하였다. 무선 링크의 시변 특성을 반영하기 위하여 2-상태 마코프 모델을 적용하고 패킷의 도착율, 전송 서비스 시간, 무선 링크의 평균 PER 등의 향으로 패킷의 평균 전송 지연시간과 평균 큐 길이를 구하였다. 메시지는 여러 개의 패킷이 결합된 것이므로 패킷의 평균 전송 지연 시간과 평균 큐 길이로부터 메시지의 전송 지연 시간을 유도할 수 있었다.

서론에 이어 2장에서는 무선 링크 및 전송 모델에 대해 설명하고 3장에서는 패킷 전송 지연 시간과 메시지 전송 지연시간에 대한 수치적 결과를 제시하고 이에 대한 토의를 하며 5장에서 결론을 맺는다.

2. 무선 링크 및 전송 모델

무선 링크의 시변 특성을 반영하기 위하여 그림 1의 2-상태 마코프 모델이 주로 사용된다[3,4,6]. 그림 1에서 상태 Good은 링크에 에러가 거의 없는 상태이고 상태 Bad는 링크 상에 에러가 많아서 올바른 패킷의 수신이 어려운 상태이다. 따라서 상태 Good의 BER, b_g 와 상태 Bad의 BER, b_b 의 관계는 $b_g < b_b$ 가 성립한다.

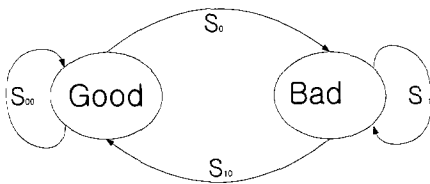


그림 1 무선 링크 모델

$S_{i,j}(i, j=0, 1)$ 는 링크가 상태 i 에서 상태 j 로 천이하는 확률이다 링크 상태 사이의 천이는 슬롯의 끝에서 확률 S_{01} 과 S_{10} 으로 발생한다고 가정하였다[3,4]. 이러한 무선 링크 모델과 가정을 기초로 무선 링크가 Bad 상태일 평형 상태(equilibrium) 확률, π_1 과 Good 상태일 평형 상태 확률, π_0 를 구하면 다음과 같다.

$$\pi_1 = \frac{S_{01}}{S_{10} + S_{01}}, \quad (1)$$

$$\pi_0 = \frac{S_{10}}{S_{10} + S_{01}}. \quad (2)$$

평균 비트 에러율, mBER을 정의하면 다음과 같다

$$mBER = \frac{S_{10}b_g + S_{01}b_b}{S_{10} + S_{01}} \quad (3)$$

한편, 블루투스의 무선 링크에서 전송에 사용되는 패킷의 종류에는 유효 부하(payload) 부분에 에러 정정 코드를 사용하지 않는 DH 패킷과 에러 정정코딩 방법으로 유효부하에 2/3FEC를 사용하는 DM 패킷이 있다. DM 패킷에 대한 Good 상태의 PER, e_0 와 Bad 상태의 PER, e_1 은 (4)와 같고 DH 패킷에 대한 PER, e_0 과 e_1 은 (5)와 같다.

$$e_i = 1 - \left[\sum_{x=0}^L \binom{3}{x} b^x (1-b)^{3-x} \right]^{42} \cdot \left[\sum_{x=0}^{\lfloor \frac{L}{10} \rfloor} \binom{15}{x} b^x (1-b)^{15-x} \right]^{\lfloor \frac{L}{10} \rfloor} \quad (4)$$

$$e_i = 1 - \left[\sum_{x=0}^L \binom{3}{x} b^x (1-b)^{3-x} \right]^{42} \cdot (1-b)^L \quad (5)$$

여기서 $i=0, 1$ 이며, $i=0$ 인 경우는 b 는 b_g 이며 $i=1$ 인 경우에 b 는 b_b 를 의미한다. L 은 패킷의 유효부하의 길이를 의미한다 각 상태의 BER에 따라 DM 패킷과 DH 패킷을 사용하면 전송 지연 시간이 줄어들 수 있다.

3. 패킷 전송 지연시간과 메시지 전송 지연 시간

본 논문에서는 해석의 단순화를 위하여 패킷 전송 과정에 다음과 같은 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.
- 한 슬롯 구간에서는 최대 한 개의 패킷만이 전송된다.
- 버퍼에 있는 패킷의 수는 ACK/NACK 패킷이나 새로운 메시지가 도착한 슬롯의 바로 다음 슬롯에서 측정한다.

성능 해석에 사용된 기호의 정의는 다음과 같다.

$q_j(k)$: k 번째 슬롯 구간의 시작에서 링크 상태 j 인 큐의 길이. 채널 상태 0 혹은 1은 각각 Good 상태 혹은 Bad 상태를 의미한다.
 $S_{i,j}(k)$: k 번째 슬롯시 링크 상태 i 에서 $(k+1)$ 번째 슬롯 구간에서 링크 상태 j 로 천이할 확률
 $a(k)$: k 번째 슬롯동안 도착하는 새로운 패킷의 수
 $p_m(k)$: $Pa(k) = m$ 즉, k 번째 슬롯 구간에 도착하는 새로운 패킷의 수가 m 일 확률
 $e_j(k)$: k 번째 슬롯 구간에 상태 j 인 링크의 패킷에러 확률

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

$q_j(k) > 0$ 에 대해서는 (6)의 관계가, $q_j(k) = 0$ 에 대해서는 (7)의 관계가 성립한다.

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

if $q_j(k) > 0$ (6)

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

if $q_j(k) = 0$ (7)

본 논문에서는 메시지의 도착 모델로 비율, λ 의 Bernoulli 프로세서를 사용하였기 때문에 한슬롯 구간, τ 에 메시지가 한 개 도착할 확률은 λ 이고 메시지의 도착이 하나도 없을 확률은 $1 - \lambda$ 이다. 또한 메시지의 길이는 평균 L 바이트의 지수 분포를 가지며 패킷 단위로 전송된다고 하였다. 전송 패킷의 최대 길이를 L_p 라 하면 길이 L_1 의 메시지가 도착하면 $\lfloor L_1/L_p \rfloor$ 개의 패킷이 도착한 것으로 생각할 수 있다. 따라서 베르누이 프로세스에 따라 도착하는 메시지를 패킷 수들의 도착 확률로 변환하건 다음과 같다. N 을 패킷 수에 대한 확률 변수라 하자 메시지의 길이가 $0 < L_1 \leq L_p$ 이면 한 개의 패킷으로 $(n-1)L_p < L_1 \leq nL_p$ 이면 n 개의 패킷으로 구성된다 따라서, 메시지가 m 개의 패킷으로 구성될 확률, $PN = m$ 은 (8)과 같다

$$PN = m = \begin{cases} 1 - \lambda & \text{if } m = 0 \\ \lambda e^{-mL_p/L} (e^{L_p/L} - 1) & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (8)$$

$A(Z)$ 를 도착하는 패킷의 수에 대한 확률 생성 함수(Probability Generating Function, PGF)라 하면, (9)와 같이 구할 수 있다[5].

$$A(z) = \sum_{i=0}^{\infty} P(N=i)z^i = (1 - \lambda) + \lambda(1 - e^{-L_p/L})z / (1 - e^{L_p/L}z) \quad (9)$$

(9)가 성립하려면 $|Z| < e^{L_p/L}$ 이어야 한다. 안정 상태(steady state)를 가정하면 (6)와 (7)와 PGF의 정의들을 사용하여 상태 j 인 큐 길이에 대한 PGF, $Q_j(Z)$ 를 (10)와 (11)로 구할 수 있다[3]

$$Q_0(z) = (z - S_{0,0}A(z)\Psi_0(z))^{-1} \\ = S_{1,0}A(z)\Psi_1(z)Q_1(z) + (z - \Psi_0(z))TA(z) \cdot q_0[0]S_{0,0} + A(z)q_1[0]S_{1,0}(z - \Psi_1(z)) \quad (10)$$

$$Q_1(z) = (z - S_{1,1}A(z)\Psi_1(z))^{-1} \\ = S_{0,1}A(z)\Psi_0(z)Q_0(z) + (z - \Psi_1(z))A(z) \cdot q_1[0]S_{1,1} + A(z)q_0[0]S_{0,1}(z - \Psi_0(z)) \quad (11)$$

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 (10)와 (11)를 사용하여 평형 상태의 큐 길이 분포에 대한 PGF, $Q(Z)$ 는 (12)와 같이 표현할 수 있다[3]

$$Q(Z) = Q_0(Z) + Q_1(Z) \quad (12)$$

(10)과 (11)로부터 (13)을 구할 수 있다.

$$Q_i(Z) = N_i(Z)/D(Z) \quad (13)$$

라 하면, 전송 큐에 기다리고 있는 패킷의 평균 개수, \bar{q} 는 (14)와 같다.

$$\bar{q} = Q'(1) = Q_0'(1) + Q_1'(1) \quad (14)$$

여기서, $f(\cdot)$ 는 $f(\cdot)$ 의 일차 미분함수를 의미한다. 또한 $Q(Z)$ 는 (15)로 표현된다

$$Q(Z) = N(Z)/D(Z) \quad (15)$$

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

$$\lim_{Z \rightarrow 1} Q(Z) = 1 \quad (16)$$

가 성립한다.

$Q(Z)$ 가 $|Z| < e^{-L_p/L}$ 가 만족되는 임의의 Z_0 에서 해석 가능하기 때문에 Rouché 정리를 사용하여 (17)과 (18)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & [S_{0,0}Z_0 + (S_{0,1}S_{1,0} - S_{0,0}S_{1,1})A(Z_0)\Psi_1(Z_0) \\ & A(Z_0)q_0[0] + S_{1,0}Z_0[Z_0 - \Psi_1(Z_0)]A(Z_0)q_1[0] = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} & [Z_0 + (S_{0,1}S_{1,0} - S_{0,0}S_{1,1})\Psi_1(Z_0)A(Z_0)][Z_0 \\ & - \Psi_0(Z_0)]A(Z_0)q_0[0] + [Z_0 + (S_{0,1}S_{1,0} - S_{0,0}S_{1,1}) \\ & \cdot \Psi_0(Z_0)A(Z_0)][Z_0 - \Psi_1(Z_0)]A(Z_0)q_1[0] = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

(16) ~ (18)을 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 (14)로부터 얻을 수 있다.

\bar{n} 를 바르게 수신된 패킷당 평균 전송 시도 횟수라 정의하면, (19)와 같다[6].

$$\bar{n} = 1 + \vec{i}_r (\vec{i}_2 - \vec{t})^{-1} \vec{v} \quad (19)$$

여기서, $\vec{i}_r = [1 \ 1]$ 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 천이하는 t 단계 천이 확률로 정의한다.

Little의 공식을 사용하여 패킷에 대한 큐에서의 평균 대기 시간, \bar{d} 는 (20)과 같이 구할 수 있다.

$$\bar{d} = \bar{q} / \lambda_p \quad (20)$$

패킷에 대한 큐에서의 평균 대기 시간, \bar{d} 는 λ_p 가 τ 에 대한 것이므로 τ 로 정규화하였다. 패킷의 전송 지연시간, T_p 는 패킷의 큐에서 평균 대기 시간과 전송이 성공할 때까지의 시간이다. 따라서 T_p 는 (21)로 정의할 수 있다.

$$\overline{T_p} = \bar{d} + \tau \bar{n} \quad (21)$$

(21)과 Little의 공식을 사용하면 실제 전송 큐에서 대기 중인 패킷의 평균 개수, $\overline{Q_p}$ 를 (22)로 구할 수 있다.

$$\overline{Q_p} = \bar{q} + \lambda_p \tau \bar{n} \quad (22)$$

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

평균 L 인 지수 분포의 메시지를 구성하는 패킷 개수의 분포 PGF, $N_p(Z)$ 는 (23)으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} N_p(Z) &= \sum_{i=0}^{\infty} P(N_p = i) Z^i \\ &= (1 - e^{-L_p/L}) Z / (1 - e^{-L_p/L} Z) \end{aligned} \quad (23)$$

따라서, N_p 의 평균, $\overline{N_p}$ 는 (24)와 같다.

$$\overline{N_p} = \frac{dN_p(1)}{dz} = \frac{1}{(1 - e^{-L_p/L})} \quad (24)$$

패킷 기반 무선 링크에서 평균 메시지 전송 지연 시간은 (21)의 평균 패킷 전송 지연 시간과 (24)의 $\overline{N_p}$ 를 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 (25)와 같다.

$$\overline{T_m} = \overline{T_p} + (\overline{N_p} - 1) \tau \bar{n} \quad (25)$$

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. (25)에 Little의 공식을 적용하면 전송 큐에 대기하는 평균 메시지의 개수, $\overline{Q_m}$ 을 (26)으로 구할 수 있다.

$$\overline{Q_m} = \lambda \cdot \overline{T_m} = \lambda T_p + \lambda \overline{N_p} \tau \bar{n} \quad (26)$$

4. 수치적 결과 및 분석

그림 2 ~ 그림 4의 수치적 결과를 얻기 위하여 대개변수 τ 를 블루투스에서 사용되는 2 슬롯 길이 (125ns)로 설정하였다. 블루투스에서는 2 슬롯 내에 데이터 송신과 ACK의 수신에 일어나기 때문이다. 허식의 편의를 위하여 상태가 변화하는 경우에도 사용을 위하여 선택된 패킷 타입(DM 혹은 DH)은 변경되지 않는 것으로 가정하였다. 또한 각 그림에서 (·, ·)는 천이 확률의 쌍 (S_{01}, S_{10})을 의미한다.

그림 2와 그림 4로부터 평균 BER 혹은 mBER(10^{-6})이 작은 경우에는 천이 확률, (S_{01}, S_{10})이 메시지의 전송 지연 시간에 영향이 거의 없지만 평균 BER이 클 경우($10^{-4}, 10^{-3}$)에는 천이 확률은 전송 지연 시간에 영향을 줄 수 있다. 또한 블루투스 시스템의 전송 안정성을 보장하기 위해서는 메시지의 도착률과 길이가 제한되어야 함을 알 수 있다. 또한 메시지의 전송 지연 시간에는 메시지의 도착률보다는 길이가 더 많은 영향을 주는 것을 볼 수 있다.

그림 3으로부터 평균 BER이 약 10^{-4} 이하까지는 DH 패킷을 전송에 사용하고 10^{-3} 이상부터는 DM 패킷을 전송에 사용하는 것이 전송 지연 시간을 최소화하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 그림 2와 그림 4에서도 알 수 있다.

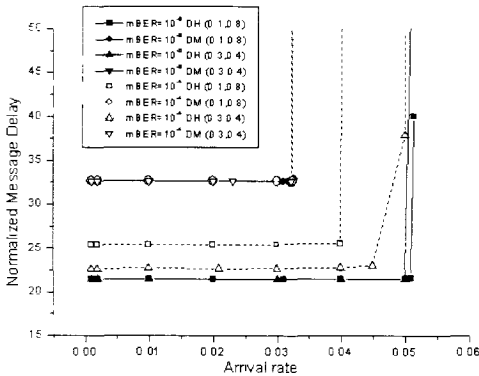


그림 2 다양한 평균 BER에서 메시지 도착률에 대한 메시지 전송 지연(메시지 길이=512B)

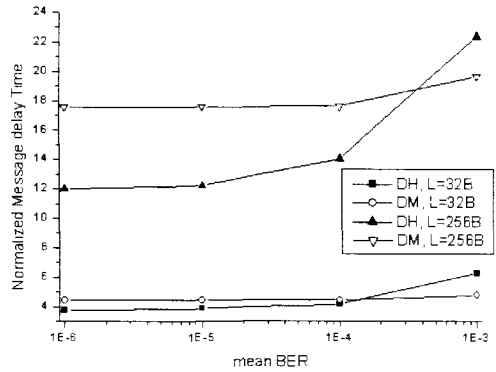


그림 3 다양한 전송 패킷 타입에서 평균 BER에 대한 메시지 전송 지연(0.1,0.8, 도착률=0.02)

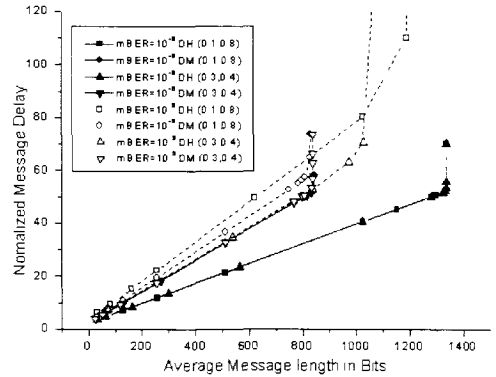


그림 4 다양한 평균 BER에서 메시지의 길이에 대한 메시지 전송 지연(도착률=0.02)

블루투스를 통하여 메시지를 전송하는 경우에는 BER를 사용하여 전송 지연 시간을 최소화할 수 있다. 이는 BER에 따라서 전송에 사용하는 패킷 타입을 DM이나 DH를 선택하여 사용하고 이를 통하여 메시지의 전송 지연 시간을 줄일 수 있기 때문이다. 블루투스 시스템의 전송 성능 안정화는 메시지의 도착률 및 길이를 제한하여야 얻을 수 있다. 또한 상태 천이 확률보다는 각 상태의 BER이 전송 지연 시간에 많은 영향을 주기 때문에 BER이 높은 상태에 머무는 시간을 줄여야 한다. 이를 위한 방법으로는 전력 제어 등으로 무선 링크의 BER 조건을 개선하는 것이 있다.

5. 결론

본 논문에서는 무선 링크의 시간 변이성을 반영하기 위하여 2 상태 마코프 모델로 모델링된 블루투스 링크에서 메시지의 전송 지연 시간을 분석하였다. 메시지의 도착은 베르누이(Bernoulli) 프로세스로, 메시지의 길이는 지수 분포로 가정하여, 패킷의 도착 분포 함수를 유도하였다. 메시지의 전송 지연 시간은 메시지의 도착율과 천이 확률, 평균 PER 등의 항으로 해석적으로 구하여 분석하였다. 블루투스 시스템의 전송 안정성을 보장하기 위해서는 메시지의 도착율과 메시지의 길이를 보다 제한할 필요가 있으며 메시지의 전송 지연 시간을 최소화하기 위한 전력 제어 등의 사용이 필요함을 보였다.

현재 여러 블루투스 단말기들이 사용될 경우 메시지 전송 지연 시간을 최소화할 수 있는 최적 전송 패킷 길이를 구하는 연구를 수행하고 있다.

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, Wiley, 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] 박흥성, 정명순, "무선 링크에서의 블루투스 ACL 패킷의 성능 분석," 한국통신학회논문지, Vol.26 No.9A, pp.1465-1474, 2001.9.