

# 무선 링크에서의 블루투스 ACL 패킷의 성능 분석

정희원 박홍성\*, 정명순\*\*

## Performance Evaluation of Bluetooth ACL Packets in Radio Link

Hong Seong Park\*, Myoung Soon Jung\*\* *Regular Members*

### 요약

본 논문에서는 BER(Bit Error Rate)과 패킷 길이에 따라 블루투스의 다양한 ACL(Asynchronous Connection Less) 패킷 종류들의 성능을 분석하였고 주어진 BER에서 적합한 패킷의 최적 종류와 길이를 제안하였다. ACL 패킷 중 DM(Data Medium Rate) 형은 1/3FEC과 2/3FEC과 ARQ 방식을 사용하지만 DH(Data High rate) 형은 2/3FEC과 ARQ만을 사용한다. 이러한 특징은 잡음이 존재하는 무선 링크 상에서 메시지의 평균 전송 시간과 처리율과 같은 성능 지표에 영향을 준다. 이러한 ACL 패킷의 PER(Packet Error Rate)을 무선 링크의 BER과 패킷 유효부하 길이의 향으로 제시하고 PER과 이에 따른 ARQ 방법에서의 재전송 회수를 고려하여 메시지의 평균 전송 시간 및 전송 효율을 구하는 방법을 제시하였다. 본 논문에서는 이를 이용하여 주어진 BER에서 성능 지표를 최대화하는 ACL 패킷의 최적 종류와 최적 길이를 제시하였다. 이를 기초로 전송 효율을 최대화하는 최적 패킷의 종류와 길이가 평균 전송 시간을 최소화하는 패킷의 종류와 길이는 다르다는 것을 보였다.

### ABSTRACT

This paper analyzes the performance of the several types of ACL(Asynchronous ConnectionLess) packets used in Bluetooth according to a BER(Bit Error Rate) and a packet length and proposes an optimal packet type and an optimal size of the packet being able to be used under the given BER. While the DM type of ACL packets uses a 1/3 rate FEC(Forward Error Correction) code, a 2/3 rate FEC code, and a ARQ(Automatic Repeat reQuest) as an error correction method, the DH type of ACL packets uses the 2/3 rate FEC code and the ARQ. These features affect performance measures such as a mean transmission time of messages and a throughput on erroneous radio links or radio links with BER. This paper proposes how to obtain the optimal packet type and the optimal size of the packet maximizing the performance measure under the given BER. In addition, this paper shows that the optimal type and size of the packet maximizing the throughput are different from those maximizing the mean transmission time. This occurs because the Bluetooth uses not only one type of packet but also various types of packets.

### I. 서론

블루투스는 근거리 무선 인터페이스를 통하여 음성 및 데이터의 전송 서비스를 지원하는 통신 프로토콜이다<sup>[1]</sup>. 블루투스 기기의 무선 네트워크 구조는 한 개의 마스터와 일곱 개까지의 슬레이브 사이에 무선 접속으로 이루어지며, 이 영역을 피코넷

(piconet)이라 한다.

블루투스 시스템은 에러 정정과 복구를 위하여 링크 계층에서 FEC와 ARQ를 사용한다. 블루투스 표준안에서는 약  $10^{-3}$  정도의 BER(Bit Error Rate)을 권고하고 있지만, 일반적인 블루투스 통신에서 무선 링크의 BER은  $10^{-2}$  정도이다. BER의 원인은 사용 가능한 대역폭의 제약과 잡음 및 다중 경로

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

\*\* 강원대학교 전기전자정보통신공학부 BK21(jms@control.kangwon.ac.kr)

논문번호 : 010098-0516, 접수일자 : 2001년 5월 16일

페이딩, 다른 피코넷의 영향 등으로 인한 신호 감쇠 등이다. 이러한 BER은 전송 패킷의 PER(Packet Error Rate)를 증가시켜 무선 링크의 전송 효율(Transmission Throughput)을 떨어지게 된다.

전송 효율을 높이기 위한 일반적인 에러 정정 방법으로 ARQ와 FEC가 있다. ARQ는 에러율이 비교적 낮은 환경에서 전송 처리율을 높이고자 사용되는 것이지만 재전송으로 인한 지연 시간의 가변성 때문에 실시간 서비스에는 적당하지 않다. 반면에 FEC는 신뢰성이 높은 에러 정정 방법으로 널리 이용되지만 불필요한 오버헤드가 크다. 이러한 ARQ와 FEC의 단점을 해결하기 위하여 제안된 것이 Hybrid ARQ 방법이다<sup>[2-5]</sup>. 이러한 Hybrid ARQ는 무선 ATM<sup>[4]</sup>이나 IP 기반 네트워크<sup>[5]</sup> 등과는 다른 형태로 적용되었다. 또한 블루투스에서는 ARQ와 FEC를 동시에 사용하고 있다. 블루투스에서는 ACL 패킷 중에서 DM1/3/5에는 Hybrid ARQ를 적용하고 DH1/3/5에는 ARQ만 적용하였다.

블루투스 시스템의 성능에 대해서는 다양한 연구들이 이루어지고 있다<sup>[6-11]</sup>. [6]에서는 전송 패킷을 대상으로 하여 무선 링크의 질에 따라 2개의 상태로 나누어 FEC의 사용 여부를 결정하고 사용 가능한 슬롯의 개수에 따라 전송하는 메시지를 알맞게 분할하는 적응적 Hybrid ARQ의 사용을 제안하였고, [2]에서는 피코넷의 중첩 환경에서 간섭을 고려하여 구한 실패 확률로 패킷의 성능을 제시하였다. 블루투스 기기의 다양한 저전력 모드(sniff, hold, park)를 이용한 적응적 알고리즘으로 전력 소비를 줄이고 간섭을 최소화하여 전송 효율을 높이는 MAC(Medium Access Control) 제어 방법을 제시하였다<sup>[8][9][10]</sup>. [11]에서는 전송 효율을 높일 수 있는 효율적인 라우팅 방법을 제안하였다.

이러한 기존의 블루투스 성능 연구에서는 앞에서 기술한 블루투스 ACL 패킷의 다양한 특성을 고려한 개별 패킷에 대한 성능, 전송효율 및 메시지의 평균 전송시간이 분석되지 않았을 뿐만 아니라, 이러한 성능을 최대/최소화하는 각 패킷의 최적 유효 부하 길이에 대한 고려도 이루어지지 않았다.

본 논문에서는 Hybrid ARQ를 고려한 블루투스 데이터 링크 계층의 성능, 전송 효율 및 메시지의 전송시간을 분석하였다. 이를 위하여 ACL 패킷 중에서 DM과 DH 패킷의 PER을 무선 링크의 BER과 패킷 유효부하 길이의 향으로 제시하고, PER과 이에 따른 ARQ 방법에서의 재전송 회수를 고려하여 메시지의 평균 전송 시간 및 전송 효율을 구하

는 방법을 제시하였다. 이러한 결과를 기초로 주어진 BER 조건에서 메시지의 평균 전송 시간을 최소화하는 ACL 패킷의 종류와 해당 패킷의 최적 유효 부하 길이를 구하여 제시하였다.

2장에서는 블루투스 시스템에 대하여 개략적으로 소개하고 3장에서는 블루투스 무선 링크에서의 ACL 패킷의 PER 및 전송 효율과 평균 전송시간과 같은 성능 지표를 해석적으로 제시하며, 4장에서 3장에서 구한 결과를 예를 통하여 분석하며, 각 BER에 따라 성능지표를 최대화하는 최적 패킷의 종류와 최적 유효부하길이를 제시하고 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

## II. 블루투스 시스템 개요

블루투스용 무선 링크 성능 해석에 사용한 네트워크 구조가 그림 1에 있다. 여기서 점선으로 그려진 원은 한 개의 마스터 통신 영역인 피코넷이며, 일곱 개까지의 통신을 수행하고 있는 슬레이브가 존재할 수 있다. 그림 1에서는 한 개의 마스터와 슬레이브만으로 구성된 피코넷을 가정하였다.

피코넷의 형성은 마스터가 주변에 블루투스 기기가 있는지를 조사하는 inquiry 과정을 수행하고 이에 대한 응답으로 임의의 블루투스 기기로부터 블루투스 디바이스 주소(BD\_ADDR)를 받으면 이루어진다. 이후에 통신을 위한 채널의 확보를 위해 페이징 과정을 거치면 슬레이브는 마스터의 클럭 정보를 받아 마스터에 시간 동기화를 맞추고 AM\_ADDR를 할당받아 통신 채널을 설정하여 데이터 송수신을 한다. 본 논문에서는 블루투스 패킷을 송수신하는 마스터와 슬레이브 사이의 채널은 미리 설정되어 있고, 패킷의 전송 중에는 채널이 끊기지 않는다고 가정하였다.

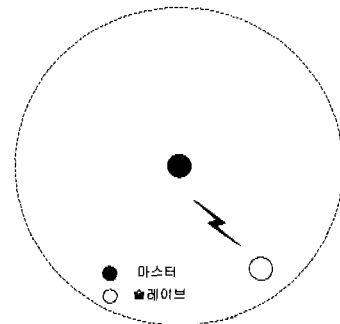


그림 1. Bluetooth의 전송 서비스 시스템

블루투스 무선 링크는 두 가지 형식, SCO (Synchronous Connection Oriented)와 ACL이 있다. 본 논문에서는 에러 정정 방법에 따른 무선 링크의 성능 분석을 수행하였기 때문에 ACL 링크만을 고려하였다. 본 논문에서 성능 분석을 수행한 ACL 패킷은 사용자 데이터와 제어 데이터를 전송하며, 데이터의 전송에 사용되는 시간 슬롯의 개수와 유효부하 부분에 에러 정정 방법의 적용 여부에 따라 표 1에 표시된 바와 같이 7개의 형태가 정의되었다. 본 논문에서는 이러한 7개의 패킷 형태 중에서 AUX1 패킷형은 고려하지 않는다. DM은 패킷의 유효부하에 2/3FEC를 적용한 것이고 DH는 에러 정정 방법을 적용하지 않은 것이다. 또한 DM1은 DM 패킷을 한 개의 시간 슬롯 구간(625 $\mu$ s)동안에 전송하는 패킷의 형태이고 DH5는 DH 패킷을 다섯 개의 시간 슬롯 구간(5 $\times$ 625 $\mu$ s)을 이용하여 전송하는 패킷이다.

표 1. ACL 패킷

패킷 형태	시간 슬롯 수	유효부하 길이	FEC	CRC
DM1	1	0 ~ 17	2/3	Yes
DH1	1	0 ~ 27	No	Yes
DM3	2	0 ~ 121	2/3	Yes
DH3	2	0 ~ 183	No	Yes
DM5	2	0 ~ 224	2/3	Yes
DH5	2	0 ~ 339	No	Yes
AUX1	1	0 ~ 29	No	No

블루투스 패킷은 그림 2와 같이 액세스 코드, 헤더, 유효부하로 구성된다. 그림 2에서 숫자의 단위는 비트이다. 이러한 부분에 적용되는 에러 정정 방법은 다음과 같다. 블루투스 시스템의 에러 정정 방법으로는 헤더에 적용되는 1/3FEC 방식과 유효부하에 적용되는 2/3FEC 방식이 있으며, FEC 방식으로 정정하지 못하는 패킷에 대해서는 ARQ 방식을 사용하여 정정한다. DM 패킷에서는 1/3FEC 방식과 2/3FEC 방식이 동시에 적용되지만, DH 패킷에는 1/3FEC 방식만 적용된다. ARQ 방식은 DM 및 DH 패킷에 모두 적용이 된다.

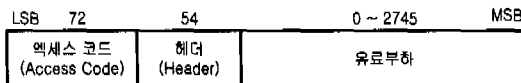


그림 2. 블루투스의 표준 패킷

블루투스 패킷의 액세스 코드 및 헤더에 사용되는 인코딩 방식은 1/3FEC로 1비트의 정보를 세 번 반복하여 전송하는 방식이다. 블루투스 패킷 중 DM의 유효부하 부분의 인코딩은 (15, 10) 해밍 코드를 사용하는 2/3FEC가 이용된다.

또한 블루투스 시스템에서는 전송 패킷의 신뢰성을 보장하기 위하여 ARQ를 사용한다. ARQ의 수행과정은 다음과 같다. 전송 단말기는 ACL 패킷을 전송한 후에 다음 슬롯 구간 동안 패킷을 수신한다. 수신된 패킷 내의 ARQN 필드가 설정(ARQN=1)되어 있으면, 자신이 전송한 패킷이 성공적으로 전송된 것으로 인지하고 다음 패킷을 전송한다. 반대로 ARQN이 0이면 패킷 전송이 실패한 것으로 생각하여 직전에 전송한 패킷의 사본을 재전송한다. 이러한 동작은 ACK(Acknowledge)를 받거나 해당 채널의 플러쉬(flush) 타이머가 종료될 때까지 반복된다. 이러한 ARQ 과정에서 ACL 패킷 유효부하 부분의 에러 검색은 CRC 패킷의 에러 검사로 이루어진다.

### III. 패킷 에러율, 처리율 및 메시지 전송 시간

본 논문에서는 유효 부하와 사용자 유효 부하를 구분하여 사용하였다. 즉, 사용자 유효 부하는 실제 사용자가 전송하고자 하는 사용자 데이터로 정의하였고 유효 부하는 사용자 유효 부하와 사용자 유효 부하를 전송하는데 첨부되는 유효부하 헤더와 CRC 부분을 모두 합친 것으로 하였다. 이들은 표 1에 설명되어 있다. 본 논문의 성능 분석 과정에서 이용하는 기호는 다음과 같이 정의된 것이다. 먼저, 패킷 (i,j)에서 i는 M과 H를 j는 1, 3, 5를 표기하는 첨자이다. 예를 들면, 패킷(M,1)은 DM1 패킷을, 패킷(H,5)은 DH5 패킷을 의미하는 것이다. 성능 분석을 위하여 다음과 같은 매개변수를 정의하였다.

$p_b$  : BER(Bit Error Rate)

$P_H$  : 패킷 헤더 부분의 에러 확률

$L_{ij}$  : 패킷(i,j)의 사용자 유효부하 부분의 길이

$P_{p_{ij}}$  : 패킷(i,j)의 유효부하 부분의 에러 확률 패킷.

$P_{ij}$  : 패킷(i,j)의 PER(Packet Error Rate)

$T_{ij}(L, p_b)$  : BER,  $p_b$ 에서 패킷 (i,j)를 사용하여 사용자 데이터 L 바이트를 전송하는데 소요되는 평균 시간.

$N_{ij}(L, p_b)$  : BER,  $p_b$ 에서 사용자 데이터 L바이트를 전송하는데 소요되는 패킷(i,j)의 평균 개수

$F$  : 패킷의 전달이 성공될 때까지 전송된 패킷 수를 나타내는 확률 변수

$P(F_{ij} = m)$  : (i,j)형의 패킷이 m번째 전달시 성공될 확률

$E(F_{ij})$  : (i,j)형 패킷을 성공적으로 전송하는데 필요한 평균 패킷 수

해석의 단순화를 위하여 피드백 채널에는 에러가 없는 것으로 가정하였다. 즉, 수신된 정상 여부를 알려주는 패킷은 항상 에러 없이 수신되는 것으로 하였다.

먼저  $E(F_{ij})$ 는 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} E(F_{ij}) &= \sum_{m=1}^{\infty} m \cdot P(F_{ij} = m) \\ &= \sum_{m=1}^{\infty} m \cdot P_{ij}^{m-1} \cdot (1 - P_{ij}) \\ &= \frac{1}{1 - P_{ij}} \end{aligned} \quad (1)$$

길이가 L 바이트인 데이터를 전송하는데 필요한 패킷(i,j)의 개수,  $N_{ij}(L, 0)$ 는 (2)와 같다.

$$N_{ij}(L, 0) = \lceil \frac{L}{L_{ij}} \rceil \quad (2)$$

아래에서는 표현의 단순화를 위하여  $N_{ij}(L, 0)$ 를  $N_{ij}$ 로 표기하였다.  $\lceil x \rceil$ 는 x보다 큰 정수 중 가장 작은 정수를 의미한다.  $N_{ij}(L, p_b)$ 에 대하여  $N_{ij}(L, 0)$ 는 비트 에러가 없는 무선 링크에서의 실제 전송 패킷의 개수이다. 따라서, 비트 에러가 있는 무선 링크에서의 전송 패킷은  $(N_{ij}(L, p_b) - N_{ij}(L, 0))$ 개가 더 전송되어야 한다. PER로부터  $N_{ij}(L, p_b)$ 를 구하면 (3)과 같다<sup>[2]</sup>.

$$N_{ij}(L, p_b) = N_{ij} + N_{ij} \cdot E(F_{ij}) \quad (3)$$

여기서,  $N_{ij} \cdot E(F_{ij})$ 는 에러가 검출되어 재전송되는 패킷의 평균 개수이다.

본 논문에서는 블루투스 무선 링크에서 패킷 전송에 이용되는 단위 시간, 슬롯의 길이는  $T_{slot}$ 으로 표현한다. 예를 들어, DM1과 DH1 패킷은 한 개의  $T_{slot}$  구간에서 하나의 패킷을 전송하고 연속되는 다음  $T_{slot}$  구간 동안에 해당 패킷을 수신한 통신 상대방으로부터의 수신 확인(ACK 또는 NAK) 패킷을 받는다. 따라서 (i,1) 타입의 패킷을 전송 간격은  $2T_{slot}$ 이 된다. (i,3) 타입인 DM3과 DH3 패킷은

$3T_{slot}$ 을 이용하여 하나의 패킷을 전송하고 연속되는 다음  $T_{slot}$ 에서 패킷의 수신 성공 여부를 알려주는 ACK 패킷을 수신하므로, 전송 간격은  $4T_{slot}$ 가 된다. 마찬가지로 (i,5) 타입, DM5와 DH5는  $6T_{slot}$ 을 소비하는 것이다. 이러한 사실과  $N_{ij}(L, p_b)$ 를 이용하여 L 바이트 데이터의 평균 전송 시간,  $T_{ij}(L, p_b)$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_{ij}(L, p_b) = N_{ij}(L, p_b) \cdot (j+1) \cdot T_{slot} \quad (4)$$

여기서, j는 1, 3, 5이고  $T_{slot}$ 는  $625\mu s$ 이다.

다음에서는 패킷(i,j) 타입의 PER,  $P_{ij}$ 를 구한다. 먼저 패킷 헤더의 에러 발생 확률과 유효부하의 에러 발생 확률은 독립적인 것으로 가정하였다. 이러한 가정으로부터 패킷 전체의 에러 확률,  $P_{ij}$ 는 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$P_{ij} = 1 - (1 - P_H) \cdot (1 - P_b) \quad (5)$$

여기서,  $(1 - P_H)$ 는 패킷 헤더의 PER이고  $(1 - P_b)$ 은 유효부하의 PER이다.

블루투스 패킷 헤더에는 1/3FEC가 적용된다. 이 1/3FEC은 1 비트를 동일한 비트를 3번 반복 전송하는 코드이기 때문에 1 비트에 대하여 에러 정정을 할 수 있다. 따라서 패킷 헤더의 에러 확률은 코드 워드가 n 비트이고, 잉여 비트가 k, 정정 비트 수가 t이며, 헤더의 전체 비트 수를 m이라 하면, 블루투스 패킷의 헤더 부분에서는 n은 3, k는 2, t는 1이 되며, m은 유효부하가 없는 경우에는 68이고 유효부하가 있는 패킷에서는 72이다. 따라서 패킷 헤더의 에러 확률은 (6)으로 구할 수 있다.

$$P_H = 1 - \left[ \sum_{x=0}^t \binom{n}{x} p_b^x (1 - p_b)^{n-x} \right]^{\lceil \frac{m}{n} \rceil} \quad (6)$$

예를 들어, 유효 부하가 있는 패킷 헤더의 에러 확률은 (7)과 같다.

$$P_H = 1 - \left[ \sum_{x=0}^1 \binom{3}{x} p_b^x (1 - p_b)^{3-x} \right]^{24} \quad (7)$$

식 (6)에서 대 괄호 내의 항은 코드 워드 내의 모든 비트가 전송에 성공할 확률과 n개의 코드 워드 비트 중에서 에러가 1비트에만 발생 정정되어져 전송에 성공할 확률의 합이다.  $\lceil \frac{m}{n} \rceil$ 는 전송 패킷 헤더에 포함된 순수 정보 비트의 개수이다. 유효부

하가 있는 패킷의 경우에는 순수 정보 비트의 길이가 24 비트이고 나머지 48 비트가 에러 정정에 사용되는 잉여 비트이다.

ACL 패킷의 타입은 DM, DH, AUX 등이 있지만 본 논문에서는 DM, DH만을 대상으로 성능 분석을 수행하였다. 먼저, 유효부하 부분에 FEC가 적용되지 않는 DH 패킷 타입 유효부하 부분의 패킷 에러율,  $P_{p_{u,i}}$ 는 식 (8)과 같다.

$$P_{p_{u,i}} = \sum_{x=1}^m \binom{m}{x} p_b^x (1-p_b)^{m-x} = 1 - (1-p_b)^m \quad (8)$$

여기서, m은 DH 패킷의 유효 부하 길이를 비트 단위로 표현한 것이다. 따라서 m은 사용자 유효 부하  $L_{H,i}$ , 유효 부하 헤더 길이, CRC 비트의 개수를 합친 값이다. 예를 들어, DH1의 m은  $L_{H,i} + 3$ 이고 DH3 와 DH5의 m은  $L_{H,i} + 4$ 이다.

한편, 유효 부하에 2/3FEC를 적용하는 DM 패킷 유효부하의 PER,  $P_{p_{u,i}}$ 는 식 (6)을 이용하여 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$P_{p_{u,i}} = 1 - \left[ \sum_{x=0}^{\lfloor \frac{m}{15} \rfloor} \binom{15}{x} p_b^x (1-p_b)^{15-x} \right]^{\lceil \frac{m}{15} \rceil} \quad (9)$$

여기서, n은 15, k는 5, t는 1이고 m은 유효부하의 비트 단위 길이로 15의 배수가 되지 않을 경우에 NULL 비트를 채워 15의 배수로 만들어진다. DH 패킷과 마찬가지로 DM1인 경우 m은  $L_{M,i} + 3$ 이고 DM3과 DH5는  $L_{M,i} + 4$ 이다.

DM과 DH 패킷의 전체 PER은 식(7), 식(8), 식(9)을 식(5)에 대입하여 식(10), 식(11)으로 각각 구할 수 있다.

$$P_{M,i} = 1 - \left[ \sum_{x=0}^{\lfloor \frac{3}{x} \rfloor} \binom{3}{x} p_b^x (1-p_b)^{3-x} \right]^{24} \cdot \left[ \sum_{x=0}^{\lfloor \frac{m}{15} \rfloor} \binom{15}{x} p_b^x (1-p_b)^{15-x} \right]^{\lceil \frac{m}{15} \rceil} \quad (10)$$

$$P_{H,i} = 1 - \left[ \sum_{x=0}^{\lfloor \frac{3}{x} \rfloor} \binom{3}{x} p_b^x (1-p_b)^{3-x} \right]^{24} \cdot (1-p_b)^m \quad (11)$$

여기서, m은 다음과 같이 정의된다.

$$m = \begin{cases} L_{\bar{u}} + 4 & \text{otherwise} \\ L_{\bar{u}} + 3 & \text{for } (i, j) = (M, 1) \text{ and } (H, 1) \end{cases} \quad (12)$$

패킷 전송 방법의 전송 효율은 전송되어야 할 패킷의 개수에 대한 실제 전송된 평균 패킷 수의 비율이라 할 수 있다. 즉, ARQ를 사용하는 블루투스 시스템에서 패킷(i,j) 타입의 처리율  $\eta_{ij}$ 는 식 (13)으로 표현할 수 있다.

$$\eta_{ij} = \frac{N_{ij}(L, 0)}{N_{ij}(L, p_b)} \quad (13)$$

식(13)에서 보듯이 전송 처리율,  $\eta_{ij}$ 는 패킷(i,j)형만을 대상으로 비교할 수 있다. 서로 다른 형의 패킷과 비교하는 것은 기준이 달라지기 때문에 의미가 없어진다. 따라서, 4장에서는 블루투스 패킷(i,j)형 각각의 최적 패킷 길이를 구하기 위하여 식(4)의 L 비트 데이터 평균 시간을 이용하였다.

식(4)을 이용하여 주어진 BER 조건에서 최적 ACL 패킷형과 해당 패킷의 최적 길이를 표시하는  $L_{opt}^1(i, j)$ 는 (14)을 이용하여 구할 수 있다.

$$L_{opt}^1(i, j) = \min_{\substack{\text{all } L_e \\ \text{all } i, j}} T_{i,j}(L, p_b) \quad \text{for each } p_b \quad (14)$$

식(13)을 이용하여 각 BER에 대한 해당 패킷 종류의 최적 길이,  $L_{opt}^2$ 는 (15)을 이용하여 구할 수 있다.

$$L_{opt}^2 = \min_{\text{all } L_e} \eta_{i,j} \quad \text{for each } p_b \text{ and each } (i, j) \quad (15)$$

각 BER에 대한 최적 패킷형과 그 패킷의 최적 유효부하 길이를 4장에서 제시할 것이다.

#### IV. 성능 분석 결과

이 장에서는 3장에서 제시한 성능 지표인 PER, 메시지의 평균 전송 시간, 전송 효율을 구하고 이를 기초로 최적 패킷형과 해당 패킷의 최적 유효부하 길이를 보였다. 먼저 무선 링크의 BER에 따른 모든 DM, DH 패킷의 PER를 그림 3에 보였다. 여기서, 전송 패킷의 길이는 전송에 허용된 최대 길이로 전송하는 것을 가정하였다. 그림에서 PER은 BER에 비례하고 DH1/3/5 패킷의 PER이 DM1/3/5에 비하여 모두 높게 나타났다. 이러한 결과는 ACL의 DM 패킷에는 헤더에 1/3FEC가 적용될 뿐 아니라 유효부하에도 2/3FEC가 사용되어 에러에 대한 내성이 DH에 비하여 상대적으로 높기 때문이다. 또한

DM1/3/5는 DH1/3/5와 각각 동일한 크기의 슬롯 구간을 이용하여 패킷을 전송하지만 DM의 패킷 길이는 DH의 60% 정도로 짧기 때문에 무선 링크의 영향을 덜 받아 PER이 낮아지기 때문이다.

그림 4~그림 14에는 2M 바이트 길이의 메시지를 DM1/3/5, DH1/3/5 패킷 중에서 한 개의 패킷만을 사용하여 각각 한 개의 마스터와 슬레이브 사이에서 전송하는 것을 가정하여 구한 평균 전송 시간과 전송 효율을 보였다. 전송에 사용된 각 패킷형은 1, 3, 5개의 슬롯 구간에 ACK나 NAK를 수신할 수 있는 피드백용 슬롯을 합쳐 2, 4, 6개를 사용하는 것으로 하였다. 여기서 피드백 슬롯 구간에서는 에러가 없는 것으로 가정하였다.

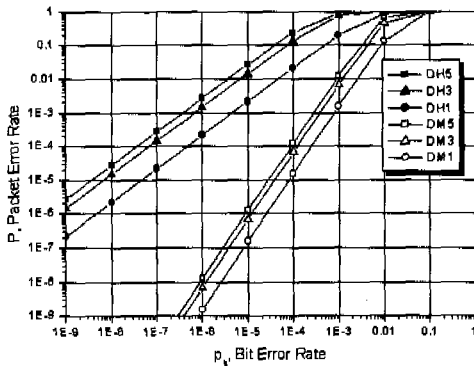


그림 3. BER의 변화에 따른 DM, DH 패킷의 PER

먼저 그림 4와 그림 5의 DM1 패킷의 성능은 평균 전송 시간은 BER이  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$ 인 경우에는 거의 같게 나타났으며,  $10^{-2}$ 에서는  $10^{-3}$  이하의 BER에서의 전송 시간보다 길어졌다. 전송 효율은 평균 전송 시간과 마찬가지로 BER이  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$ 에서 거의 비슷한 특성을 보이고  $10^{-2}$ 만이 낮게 나타났다. 이러한 결과로부터 DM1의 경우 블루투스 표준안의 권고 BER인  $10^{-3}$  이하의 조건에서는 평균 전송 시간과 전송 효율이 거의 비슷하다는 것을 알 수 있다. 즉, BER이  $10^{-2}$  정도로 높지만 않다면 DM1은 어떤 BER 조건하에서 비슷한 성능을 보였다. 또한 유효 부하 길이에 따른 평균 전송 시간과 전송 효율을 모두 고려한 DM1의 최적 유효 부하 길이는 허용된 최대 길이(17바이트)를 사용하여도 성능 저하가 일어나지 않는 것을 알 수 있다. DH1 패킷의 유효 부하 길이 변화에 따른 평균 전송 시간과 전송 효율을 서로 다른 무선 링크의 BER 조건에서 구한 것을 그림 7과 8에 보였다. 여기서, DH1의 평균 전송

시간은 BER이  $10^{-3}$  이하에서는 DM1과 같이 패킷의 유효부하에 반비례하지만, 비교적 높은 BER 조건인  $10^{-2}$  이상에서는 패킷 유효부하의 길이가 15바이트 이상부터는 증가하였다. 전송 효율의 경우에도 거의 비슷한 결과를 보여준다. 따라서 DH1의 경우 블루투스 표준안의 권고 BER 조건인  $10^{-3}$  이하에서는 허용된 최대 유효부하 길이를 전송에 사용하도록 되지만 BER이  $10^{-2}$  이상에서는 평균 전송 시간 측면에서는 패킷 유효부하의 최적 길이가 15바이트가 되지만 전송 효율 면에서는 허용된 최대 유효부하 길이에서 최대로 나타났다. DM3/5와 DH3/5의 성능도 BER 조건에 따라 다르지만 DM1과 DH1이 앞에서 언급한 분석 내용과 비슷한 결과를 보였다. 하지만 유효부하의 길이가 증가한 만큼 BER의 영향도 증가하였다. DM3/5은 DM1과 마찬가지로 BER이  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$ 인 경우에 메시지 평균 전송 시간과 전송 효율에서는 차이가 거의 없고  $10^{-2}$ 인 경우에서만 성능 지표에서 차이가 생기며 최적 유효부하 길이가 최대 유효부하 길이와 같지 않다.

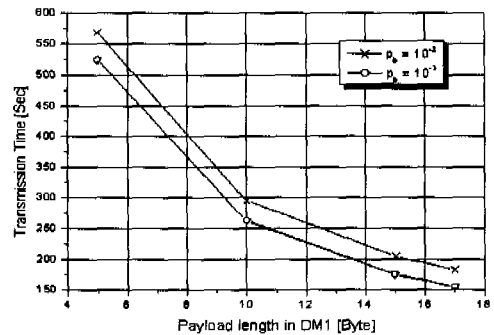


그림 4. BER과 유효부하 길이 변화에 따른 DM1 패킷의 평균 전송 시간

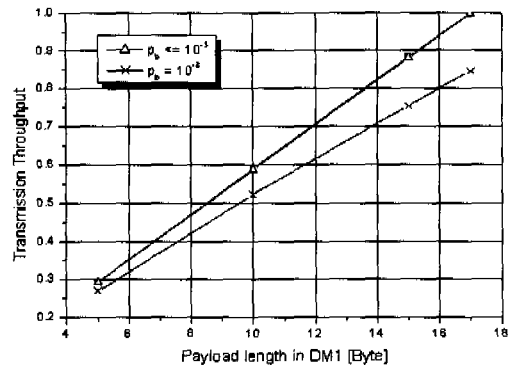


그림 5. BER과 유효부하 길이 변화에 따른 DM1 패킷의 전송 효율

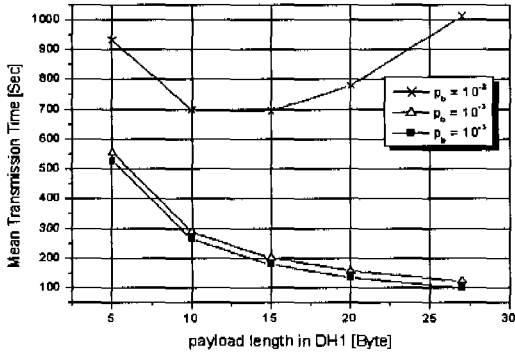


그림 6. BER과 유효부하 길이 변화에 따른 DH1 패킷의 평균 전송 시간

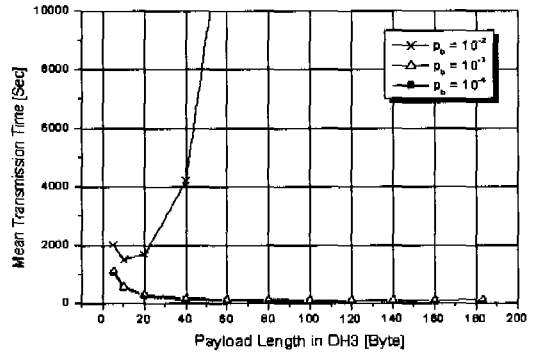


그림 9. BER과 유효부하 길이 변화에 따른 DH3 패킷의 평균 전송 시간

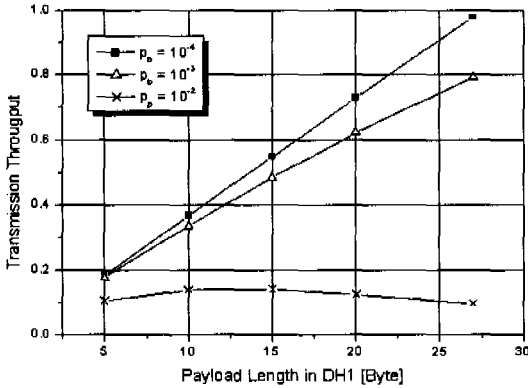


그림 7. BER과 유효부하 길이 변화에 따른 DH1 패킷의 전송 효율

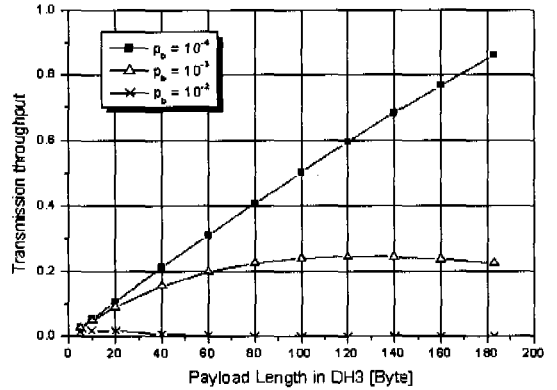


그림 10. BER과 유효부하 길이 변화에 따른 DH3 패킷의 전송 효율

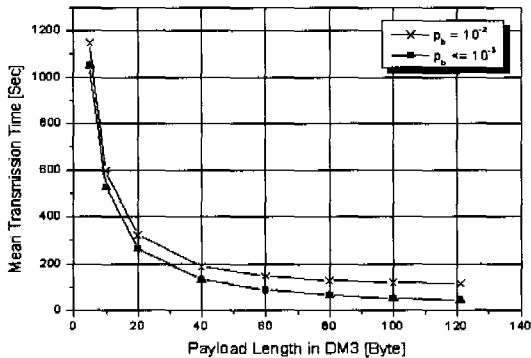


그림 8. BER과 유효부하 길이 변화에 따른 DM3 패킷의 평균 전송 시간

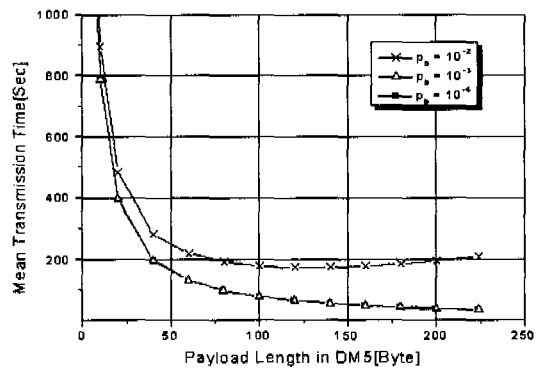


그림 11. BER과 유효부하 길이 변화에 따른 DM5 패킷의 평균 전송 시간

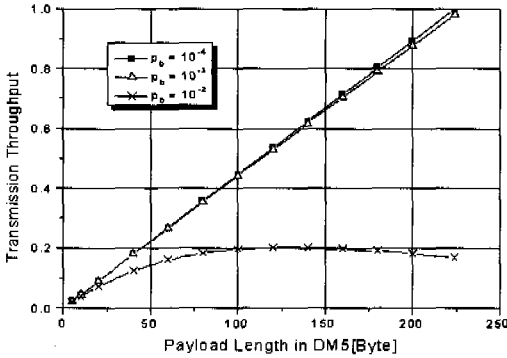


그림 12. BER과 유효부하 길이 변화에 따른 DM5 패킷의 전송 효율

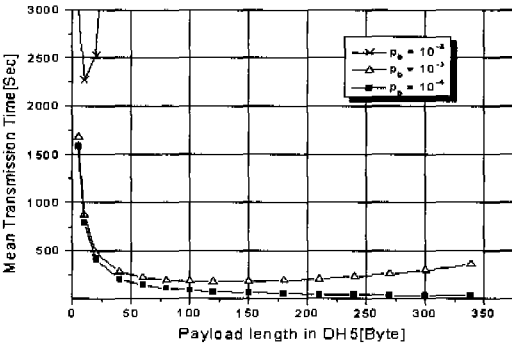


그림 13. BER과 유효부하 길이 변화에 따른 DH5 패킷의 평균 전송 시간

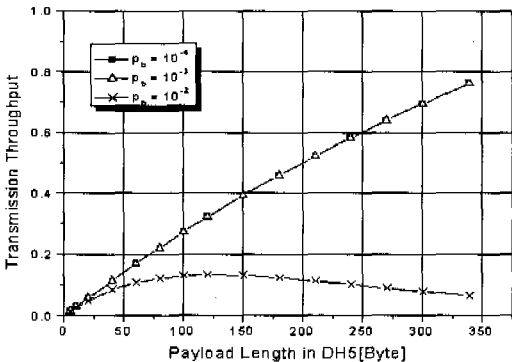


그림 14. BER과 유효부하 길이 변화에 따른 DH5 패킷의 전송 효율

DH3/5는 메시지 평균 전송 시간과 전송 효율에서는 차이가 많으며, BER이 10<sup>-3</sup>인 경우에 최적 유효부하 길이가 각각 120바이트이다. 하지만 BER이 10<sup>-4</sup> 이하인 경우에는 최대 유효부하 길이가 최적 유효부하 길이와 동일하였다.

앞에서 보인 그림 4~그림 14의 결과를 표 2에 정리하였다. 표 2에서 ACL 패킷의 전송 효율은 모든 BER 조건에서 DM1, DM3, DM5, DH1, DH3, DH5 순으로 동일하게 나타난다. 패킷의 PER에 비례하여 ARQ로 인한 재전송은 증가하게 되고 이로 인한 부하의 증가는 전송 효율을 감소시키게 된다. ACL의 DM 패킷은 헤더는 물론 유효부하에도 2/3FEC이 적용되므로 PER이 DH에 비하여 상대적으로 낮다. 또한 DM1/3/5는 DH1/3/5와 각각 동일한 크기의 슬롯 구간을 이용하여 패킷을 전송하지만 DM의 패킷 길이는 DH의 60% 정도로 짧다. 이는 DM이 DH에 비하여 패킷의 길이가 짧아서 무선 링크의 단점인 비트 에러의 영향이 상대적으로 작아서 PER이 낮아진다는 것을 의미한다. 따라서 전송 효율 면에서 모든 BER 조건에서의 최적 전송 패킷은 DH 보다는 DM이 높고 같은 DM 내에서도 한 번에 전송하는 패킷의 길이가 짧은 DM1이 DM3나 DM5에 비하여 높게 나타나는 것이다.

전송 효율과 달리 평균 전송 시간 측면에서는 최적 패킷이 BER에 따라 다르며, 해당 패킷의 최적 유효부하 길이가 패킷의 최대 유효부하 길이가 됨을 알 수 있다. 예를 들어, BER이 10<sup>-2</sup>에서는 DM3이지만 10<sup>-3</sup>에서는 DM5이고 10<sup>-4</sup>인 경우에는 DH5가 된다. 이러한 현상은 평균 전송 시간의 결과가 전송 효율과 마찬가지로 ARQ에서의 재전송 회수와 패킷 길이에 의한 함수이면서 동시에 슬롯 구간의 크기에 영향을 받기 때문이다. 전송 효율은 단순히 원하는 패킷의 개수에 대한 실제 전송된 패킷의 개수의 비율로 구하지만 평균 전송 시간은 실제 전송된 패킷이 이용한 슬롯 구간이 고려되므로 전송 효율에서와 다른 특성을 보이는 것이다. 또한 표 2는 주어진 BER에서 해당 패킷의 평균 전송 시간을 최소화하는 패킷의 최적 유효부하 길이를 보여준다. 예를 들면, DH3을 사용할 경우에 BER이 10<sup>-2</sup>, 10<sup>-3</sup>, 10<sup>-4</sup>에서 유효부하의 최적 길이는 각각 10, 120, 183 바이트이다. 표 2의 열 중에서 구분의 ① 행은 최적 유효부하길이를 바이트 단위로 표현한 것이고 ② 행은 평균 전송 시간을 초 단위로 표현한 것이며 ③은 전송효율의 행이다.

### V. 결론

본 논문에서는 블루투스 ACL 패킷 중에서 DM1/3/5와 DH1/3/5에 대한 성능을 분석하였다. ACL 패킷은 여러 정정 방법으로 DM 형과 DH 형



을 사용한다. DM 형은 패킷 헤더 부분에 1/3FEC을 유료부하 부분에 2/3FEC를 사용하고 DH 형은 헤더 부분에 DM 형과 같은 코딩 방법을 사용하지만 유료부하 부분에는 FEC를 사용하지 않는다. 또한 무선 링크 상의 에러 정정을 위하여 DM, DH 패킷 모두에 수신측에서 유료부하 내의 CRC 패킷 에러를 검사하여 재전송을 요구하는 ARQ 방법이 적용된다.

표 2. ACL 패킷의 성능

패킷형	BER	구 분	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>
			DM1	①	17
		②	182.29	154.48	154.20
		③	0.846	0.998	0.999
DH1		①	15	27	27
		②	694.22	122.47	99.371
		③	0.140	0.793	0.977
DM3		①	121	121	121
		②	115.47	43.79	43.335
		③	0.375	0.989	0.999
DH3		①	10	120	121
		②	1509.9	116.95	43.335
		③	0.020	0.245	0.999
DM5		①	120	224	224
		②	174.66	35.794	35.119
		③	0.201	0.981	0.999
DH5		①	5	150	339
		②	3030.2	178.44	30.506
		③	0.008	0.130	0.761

본 논문에서는 이러한 ACL 패킷의 PER를 무선 링크의 BER과 패킷 유료부하 길이의 함수로 제시하고 PER과 이에 따른 ARQ 방법에서의 재전송 회수를 고려하여 메시지의 평균 전송 시간 및 전송 효율을 구하는 방법을 제시하였다. 또한 주어진 BER하에서 평균 전송시간을 최소화하는 패킷형과 그 패킷의 최적 유료 부하길이를 제시하였다.

ACL 패킷의 전송 효율은 모든 BER 조건에서 DM1, DM3, DM5, DH1, DH3, DH5 순으로 동일하게 나타났다. 하지만 평균 전송 시간을 기준으로 한 경우는 BER에 따라 변화하였다. 예를 들어, 전송 효율 면에서는 DM1 패킷이 가장 좋은 성능을 보이지만 평균 전송 시간을 최소화하는 면에서는 BER이 10<sup>-2</sup>, 10<sup>-3</sup>, 10<sup>-4</sup>인 경우에 각각 DM3, DM5, DH5가 되었다.

한편, 블루투스 표준안의 권고 BER 조건, 10<sup>-3</sup>에서 최대 전송 효율을 보이는 패킷은 DM1이지만 최소 평균 전송 시간은 나타내는 패킷은 DM5이었다. 하지만 DM1의 평균 전송 시간은 약 154초이고 DM5는 35초로 DM1이 약 4.4배 정도의 시간이 더 걸리는 것으로 나타났다. 따라서, 블루투스 시스템의 무선 링크에서 전송 패킷 타입을 선택하는데 사용하는 기준은 통신 시스템의 일반적인 성능 기준인 전송 효율보다는 평균 전송 시간을 사용하는 것이 적합하다. 앞으로의 연구과제는 본 논문의 결과를 기초로 블루투스 무선 링크의 패킷 전송 알고리즘을 구현하고 성능을 검증하여 보는 것이다.

참 고 문 헌

- [1] <http://www.bluetooth.com>
- [2] A. R. Prasad, et al., "Performance of Hybrid ARQ for IP Packet Transmission on Fading Channel," IEEE Transaction on Vehicular Technology, Vol. 48, No. 3, pp. 900-910, May 1999.
- [3] B. Vucetic, "An Adaptive Coding Scheme for Time-varying Channels," IEEE Transaction Communications, Vol. 39, No. 5, May 1991.
- [4] S. Kallel, D. Haccoun, "Generalized Type-II Hybrid ARQ Scheme Using Punctured Convolutional Coding," IEEE Transaction Communications, Vol. 38, no. 11, pp. 1828-1846, Feb. 1990.
- [5] M. A. Kousa, A. K. Elhakeem, H. Yang, "Performance of ATM Networks Under Hybrid ARQ/FEC Error Control Scheme," IEEE ACM, Vol. 7, No. 6, pp. 917-925, Dec. 1999.
- [6] Das, A., et al., "Adaptive Link-level Error Recovery Mechanisms in Bluetooth," Personal Wireless Communications, 2000 IEEE International Conference on, pp. 85-89, 2000.
- [7] Zurbes, S., et. al., "Radio network performance of Bluetooth," ICC'2000, Vol. 3, pp. 1563-1567, 2000.
- [8] Kalia, M., Bansal, D., Shorey, R., "Data scheduling and SAR for Bluetooth MAC," Vehicular Technology Conference Proceedings, 2000. VTC 2000-Spring Tokyo. 2000 IEEE 51st, Vol. 2, pp. 716-720, 2000.

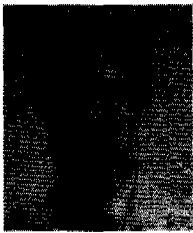
[9] Garg, S., Kalia, M., Shorey, R, "MAC scheduling policies for power optimization in Bluetooth: a master driven TDD wireless system," Vehicular Technology Conference Proceedings, 2000. VTC 2000-Spring Tokyo. 2000 IEEE 51st, Vol. 1, pp. 196-200, 2000.

[10] Kalia, M., Bansal, D., Shorey, R. "MAC scheduling and SAR policies for Bluetooth: a master driven TDD pico-cellular wireless system," MoMuC'99, pp. 384-388, 1999.

[11] Y. Lim, et. al., "Performance evaluation of the Bluetooth-based Internet Access Point," Information Networking'2001, pp643-648, 2001.

박 홍 성(Hong Seong, Park)

정회원



1983년 2월 : 서울대학교  
제어계측공학과 졸업

1986년 2월 : 서울대학교  
제어계측공학과 석사

1992년 2월 : 서울대학교  
제어계측공학과 박사

1983년~1990년 : 삼성전자

1992년~현재 : 강원대학교 전기전자정보통신공학부  
<주관심 분야> 실시간 네트워크, 네트워크 기반 제어 시스템, 이산현상시스템, 블루투스, 무선 데이터 통신 해석 프로토콜 설계 및 분석

정 명 순(Myoung Soon, Jung)

정회원



1989년 2월 : 강원대학교  
전자공학과 졸업

1992년 8월 : 강원대학교  
전기공학과 석사

1999년 2월 : 강원대학교  
전자공학과 박사

2001년 9월~현재 : 강원대학교 전기전자정보통신공학부 BK21 교수  
<주관심 분야> 이동 통신망에서의 실시간 서비스 블루투스