

논문 2016-53-8-1

저전력 블루투스 네트워크에서 장치 탐색을 위한 Advertising 횟수에 관한 분석

(An Analysis on the Number of Advertisements for Device Discovery
in the Bluetooth Low Energy Network)

김 명 진*

(Myoung Jin Kim[Ⓢ])

요 약

저전력 블루투스(BLE) 기술이 저속 저에너지 무선 센서 네트워크 기술로 주목을 받고 있다. BLE 기반의 무선 네트워크에서는 신속한 장치 탐색이 매우 중요하며, 네트워크 노드들이 보통 동전형 배터리로 매우 긴 시간 동안 동작해야하기 때문에 에너지 소모를 최소화하여 운영할 필요가 있다. 그러나 낮은 에너지와 짧은 지연시간을 동시에 얻기 어렵기 때문에 BLE 규격에서는 장치 탐색 프로세스에 관련된 파라미터들의 값 범위를 넓게 허용하여 응용에 맞게 설정하도록 하고 있다. 따라서 BLE 네트워크 운영에 앞서 장치 탐색 프로세스 관련 파라미터의 값에 따른 성능을 분석할 필요가 있다. 본 논문에서는 BLE 네트워크에서 장치 탐색을 위한 advertising 횟수의 평균과 누적분포함수에 대해 분석하였다. 또한 소모 에너지 증가가 거의 없으면서 장치 탐색의 성능을 개선할 수 있는 advertising 이벤트 간 간격을 제어하는 방안을 제안하였다.

Abstract

Bluetooth Low Energy (BLE) protocol has attracted attention as a promising technology for low data throughput and low energy wireless sensor networks. Fast device discovery is very important in a BLE based wireless network. It is necessary to configure the network to work with minimized energy consumption because the BLE network nodes are expected to operate a long time typically on a coin cell battery. However, since it is difficult to obtain low energy and low latency at the same time, the BLE standard introduces wide range setting of parameters related to device discovery process and let the network operators to set up parameter values for the application. Therefore, it is necessary to analyze the performance of device discovery according to the related parameter values prior to BLE network operation. In this paper we analyze the expected value and the cumulative distribution function of the number of advertisements for device discovery in the BLE network. In addition, we propose a scheme for controlling the interval between advertising events that can improve the performance of device discovery without increasing energy consumption.

Keywords: Bluetooth Low Energy(BLE), device discovery, advertising, scanning, wireless sensor network

I. 서 론

매우 낮은 에너지로 동작하는 개인용 센서 네트워크를 구성하는 데 적합한 기술로 저전력 블루투스(Bluetooth

Low Energy: BLE)^[1] 기술이 주목을 받고 있다. BLE는 2.4 GHz 주파수 대역에서 저전력 저용량 데이터 전송을 지원하는 통신 기술로서 블루투스 버전 4.0부터 규격에 포함되어 있다. 개인용 센서들은 동전형(coin cell) 배터리만 가지고 수개월 내지 수년 동안 동작하는 것이 바람직하기 때문에 지극히 낮은 수준의 에너지를 소모하는 통신 프로토콜이 요구된다. 기존 블루투스는 빠른 주파수 도약, 연결 지향성(connection-oriented) 동작 및 복잡한 접속 과정 때문에 위와 같은 요구를 만족시키지 못한다. BLE는 비동기식 비연결형(asynchronous connectionless) MAC을 기반으로 한 프로토콜로 동작한다. 따라서 대

* 정회원, 한국외국어대학교 정보통신공학과
(Dept. of Information and Communications Eng., Hankuk University of Foreign Studies)

Ⓢ Corresponding Author (E-mail : mjkim@hufs.ac.kr)

※ 이 연구는 2016학년도 한국외국어대학교 교내학술연구비의 지원에 의하여 이루어진 것임.

Received ; April 14, 2016 Revised ; July 20, 2016

Accepted ; July 25, 2016

기 시간(latency)이 작고 빠른 트랜잭션이 가능하며, 동작 주기(duty cycle)가 매우 작아서 대부분의 시간 동안 슬립 모드(sleep mode)에 있기 때문에 전력 소모가 매우 작다.

흔히 비교되는 대표적인 WPAN(Wireless Personal Area Network) 기술인 ZigBee^[2]에 비해 BLE는 동작 주기가 작고 데이터 전송량이 적은 응용에 더욱 적합하다. ZigBee가 30mA의 소비전류를 사용하여 100m 반경 범위에 있는 노드들과 통신하는데 비해 BLE는 15~20mA의 전류를 사용하여 50m 반경 이내(보통 10m 정도)의 장치들과 연결되도록 설계되어 있다. BLE에서는 모든 장치들이 직접 연결될 수 있도록 근접해있기 때문에 스타 토폴로지(star topology)를 사용하여 네트워크를 구성하는데, 라우팅 프로토콜이 필요하지 않아서 복잡도가 감소하며, 전력 소모와 대기 시간을 줄일 수 있다. 이와 같은 기술적 특성으로 BLE는 무선 인체영역 통신(Wireless Body Area Network: WBAN)이나 차량 내 무선센서 네트워크(Intra-Vehicular Wireless Sensor Network: IVWSN), IoT(Internet of Things) 등에 응용하는 연구 개발이 진행되고 있다^[3-7].

BLE는 기존 블루투스와 많은 특성을 공유하고 있으나 프로토콜의 간결성을 위하여 상당 부분 변경되어 두 종류의 장치 간 호환성은 없다. 기존 블루투스가 1 MHz 대역폭의 79 개 주파수 채널을 사용하는데 비해 BLE는 2 MHz 대역폭의 40 개 주파수 채널을 사용한다. 40 개의 채널 중에서 3 개 채널(채널번호 37, 38, 39)은 advertising 채널로 정의되어 있는데, 장치 탐색을 위한 정보를 보내거나 짧은 데이터를 브로드캐스팅하는 용도로 사용된다. 나머지 37개 채널은 지정된 장치 간에 데이터를 주고받는데 사용된다. 데이터율은 1 Mbps이며 변조는 GFSK(Gaussian Frequency Shift Keying)를 사용한다. 혼잡한 ISM 대역에서의 간섭을 회피하기 위한 수단으로 기존 블루투스에서와 같이 주파수도약(frequency hopping: FH)을 사용하는데, 기존 블루투스와 차별되는 것은 주파수 도약이 느리게 일어난다는 것이다. 즉 한 채널에 머무르는 시간이 길어져서 타이밍 정확도 요구 조건이 완화되었다. 또한 BLE에서는 상태 머신(state machine)이 간결하게 설계되어서 장치 발견 시간을 단축시키거나 전력을 절감하는데 유리하다.

다른 차별점으로 기존 블루투스에서는 한 피코넷에서 마스터 장치가 7 개까지의 액티브 슬레이브와 연결이 가능하지만 BLE에서는 마스터 장치와 연결될 수 있

는 장치의 수에 제한이 없다. 이러한 BLE의 장치 연결 능력은 기존 블루투스에 비해 분명한 장점이기는 하지만 매우 밀집된 환경에서 장치들의 발견(discovery)이나 연결(connection)이 원활하게 이루어질 것인지 검증할 필요가 있다.

앞서 기술한 바와 같이 BLE를 WBAN이나 IVWSN에 적용하는 경우 신속한 장치 탐색(즉 작은 지연시간)이 매우 중요하다. 또한 BLE 기반의 네트워크 노드들은 동전형 배터리로 동작하는 것을 지향하기 때문에 에너지 소모를 최소화하여 운영할 필요가 있다. 그런데 낮은 에너지와 짧은 지연시간은 기본적으로 동시에 얻기 어려운 특성이다. 이와 같은 이유로 BLE 규격에서는 장치 탐색 프로세스와 관련된 파라미터들을 지연시간과 에너지 소모와 관련하여 설정 가능한 값의 범위를 넓게 허용하고 있다. 따라서 응용에 따라 요구되는 조건(지연 시간 또는 에너지 소모율)에 부합하도록 장치 발견 프로세스의 파라미터 값을 결정해야 한다. 그러므로 BLE 네트워크에서 장치 발견 프로세스 관련 파라미터의 값에 따른 장치 발견 성능을 평가할 필요가 있으며 이것이 본 논문의 배경이다.

기존 블루투스 프로토콜에서의 장치 탐색 성능 분석은^[8-10]에 제시되어 있다. [8]에서는 실제 장치들을 사용하여 실험을 통해 성능을 분석하였다. 파라미터 설정을 변화시켜가면서 장치 발견 소요시간과 전력 소모값을 측정하는 방식으로 연구를 수행하였다. [9]에서는 시뮬레이션 방식을 사용하였는데, 멀티 홉 블루투스 네트워크, 즉 scatternet에서 장치 발견 성능을 분석하였다. 한편 [10]에서는 해석적인 방법을 사용하여 블루투스 장치 발견 성능을 분석하였는데, 확률적 모델 검증 기법과 PRISM이란 도구를 사용하여 장치 발견 대기 시간의 기댓값과 소비 전력의 기댓값에 대한 임계치를 계산하였다.

BLE 네트워크에 대한 성능 분석은^[11-12]에 보고되어 있다. [11]에서는 3 개 advertising 채널 기반의 장치 발견 확률적 모델을 제시하고 평균 지연시간을 해석적인 방법으로 유도하였다. 그러나 이론적으로 구한 평균 지연시간에 대한 수식이 너무 복잡하고 관련된 변수가 많아서 실제 환경에 적용하는 데 어려움이 있다. 또한 파라미터 값에 대한 특정 조건이 만족되지 않는 경우에는 유도된 수식의 정확도가 매우 떨어지는 문제가 있다. 또한 지연시간 기준의 분석은 에너지 사용 정도에 대한 예측을 하기 어렵다는 한계도 있다. [12]에서는 connection 모드에서 마스터-슬레이브 간 데이터 전송량의 상한선에

대해 분석하였다. 전송량을 비트오율(BER)과 *connInterval* 과 같은 파라미터의 함수로서 제시하였다.

본 논문에서는 BLE 장치 탐색 과정에서 지연시간이 아니라 advertising 패킷 전송 횟수에 관한 확률적 분석을 수행하였다. Advertising 횟수를 분석하면 장치 탐색 과정에서 소요되는 에너지와 지연시간을 예측하기 쉽다. 구체적으로 advertiser가 주기적으로 전송하는 advertising 패킷이 scanner에서 포획될 때까지의 평균 전송횟수와 누적분포함수를 관련 파라미터의 함수로서 제시하였다. 파라미터 설정값이 특정 영역에 있는 경우 장치 탐색을 위한 advertising 횟수가 매우 커지는 불안정 영역이 있음이 확인되었다. 이러한 장치 탐색의 불안정성을 개선하기 위한 알고리즘을 제안하였다. 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 BLE 프로토콜 개요와 BLE 장치 탐색 프로세스에 관하여 설명한다. 3절에서는 장치 탐색을 위한 advertising 횟수에 대한 확률적 분석에 대해 기술한다. 4절에서는 장치 탐색 성능 개선을 위한 advertising 방안을 제시하며, 5절에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. BLE 프로토콜 개요

BLE에는 장치의 기본 능력을 나타내는 프로파일 역할(profile role)의 개념이 도입되어 있다. 이는 응용 프로파일과는 관계가 없고 BLE 장치 간 통신과 관련된 기능을 나타낸다. 프로파일 역할은 장치의 특성에 따라 두 가지 부류로 나뉜다. 즉 단방향 장치용 프로파일 역할과 양방향 장치용 프로파일 역할로 구별할 수 있다. 단방향 장치용 프로파일 역할은 브로드캐스터(broadcaster)와 옵저버(observer)가 있다. 브로드캐스터 프로파일 역할의 장치는 송신기만 가지고 있으며 “advertising”이란 기능을 수행하는데, advertising 모드에서 브로드캐스터는 정보 데이터가 들어 있는 advertising 패킷을 전송한다. 메시지의 전송은 시간 구동형(예를 들어 일정 주기로 온도를 전송) 또는 이벤트 구동형(예를 들어 물체의 운동이 감지될 때 데이터를 전송)으로 일어나게 할 수 있다. 브로드캐스터에 대응하는 옵저버 프로파일 역할의 장치는 수신기만 들어 있는 장치로 “scanning”이란 기능을 수행하면서 브로드캐스터가 보내는 advertising 패킷을 받아들인다. 옵저버 장치는 브로드캐스터 장치에게 확인응답(acknowledgement) 또는 응답 메시지를 다시 보내지 않는다.

양방향 장치용 프로파일 역할은 센트럴(central)과 페

리페럴(peripheral)이 있는데, 이 프로파일 역할의 장치는 송신기와 수신기 모두를 가지고 있다. 이 장치들이 수행하는 기능 모드로 “advertising”, “scanning”, “initiating”, “connection”이 있다. 페리페럴 프로파일 역할의 장치가 advertising 기능 모드에서 메시지를 advertising 패킷에 실어 보내면 센트럴 프로파일 역할의 장치가 scanning 기능 모드에 있으면서 메시지를 받아들인다. 양방향으로 데이터를 주고받는 연결(connection)을 원하는 경우 센트럴 프로파일 역할의 장치는 initiating 모드로 넘어가서 연결을 시도한다. 연결 상태에 들어가면 양 장치들은 connection 모드로 들어가는데, 센트럴 장치는 마스터(master)가 되고 페리페럴 장치는 슬레이브(slave)가 된다. 기존 블루투스보다 마스터가 연결할 수 있는 슬레이브 수는 이론적으로 액세스 주소가 허용하는 범위만큼 매우 크다. 또 다른 차이점으로 BLE의 슬레이브는 하나의 마스터에만 연결될 수 있다.

BLE의 40 개 채널 중에서 37 개는 데이터 채널로 사용하고 3 개는 advertising 채널로 사용된다. Advertising은 BLE 네트워크의 기본을 이루는 동작으로 브로드캐스터나 페리페럴은 대부분의 시간을 슬립 모드에 있다가 깨어나서 데이터를 보내거나 연결 시도 메시지를 보낸다. 데이터 채널을 통해서만 지정된 장치 간 데이터를 상호 주고받는데, 적응 주파수 도약(adaptive frequency hopping: AFH) 기법을 사용하여 채널을 변경한다. 새로운 데이터 이벤트마다 새로운 주파수 채널로 이동하여 데이터를 전송한다. BLE에서 물리 채널은 이벤트(event)라는 시간 단위로 분할되는데, advertising 이벤트와 connection 이벤트가 있다.

데이터 채널은 connection 모드에서만 사용되는데, 브로드캐스터나 옵저버 프로파일 역할의 장치는 데이터 채널을 사용하지 않는다. Advertising 채널은 데이터를 브로드캐스팅하거나 주변의 다른 장치(scanning 모드에 있는 장치)를 발견하거나, 또는 connection을 이루도록 하는 데(initiating 모드) 사용된다. Advertising은 advertising 이벤트 동안 일어나는데, 브로드캐스터 또는 페리페럴 역할의 장치가 advertising 패킷을 세 개의 advertising 채널에 반복적으로 전송한다. 이 패킷에는 advertiser가 탐색 가능한지(discoverable) 및 연결 가능한지(connectable) 여부에 대한 정보를 담고 있으며, 또한 추가의 정보가 있으니 자료를 요청하라는 메시지를 담을 수 있다. 센트럴 프로파일 역할의 장치는 advertising 패킷을 받은 다음 두 종류의 응답 패킷을 보낼 수 있다. 하나는 추가 정보를 요청하는 응답 패킷이고, 다른 하나는 connection

을 만들자고 요구하는(initiating 기능 모드에서) 메시지 패킷이다.

1. 패킷 유형과 상태 머신

BLE 링크 레이어(Link Layer) 패킷 포맷은 그림 1에 보인 바와 같이 간단한 구조를 가지며, advertising 채널 패킷이나 데이터 채널 패킷 모두 동일한 구조를 사용한다. 패킷 길이는 10~47 바이트의 길이를 가지며 4 개의 필드로 구성되어 있다. Advertising 채널 PDU(protocol data unit)는 2 바이트의 헤더와 0~37 바이트의 페이로드(payload)로 구성된다. 페이로드는 다시 6 바이트의 장치 어드레스와 0~31 바이트의 데이터 필드로 구성되어 있다. 따라서 데이터의 양이 31 바이트를 초과하는 경우에는 한 번에 보내지 못하고 추가로 보내야 한다(물론 추가의 데이터가 있다고 앞선 advertising 패킷에서 알려야 한다).

Preamble	Access address	PDU	CRC
1 octet	4 octets	2-39 octets	3 octets

그림 1. BLE 패킷 포맷
Fig. 1. BLE packet format.

Advertising 채널로 전송되는 PDU는 7 가지 유형이 있는데, advertising PDU로 4 가지, 이에 대한 응답으로 scanning PDU 2 가지와 initiating PDU가 있다. Advertising PDU는 advertising 모드에 있는 장치(즉 브로드캐스팅 또는 페리페럴 역할의 장치)가 전송하는 PDU 유형으로 이 패킷에 대한 응답을 받는 경우도 있고(ADV_SCAN_IND, ADV_IND, ADV_DIRECT_IND) 받지 않는 경우도(ADV_NONCONN_IND) 있다. Scanning PDU로서 SCAN_REQ는 센트럴 장치가 advertising 패킷을 받고 추가의 정보를 요청하는 패킷이며, SCAN_RSP는 다시 이 요청에 응하여 추가의 데이터를 advertising 하는 패킷이다.

센트럴 장치가 initiating 상태에 있는 동안 advertising 패킷을 받고, 그 내용에 advertiser가 connection을 만들 수 있다는 정보가 있으면 센트럴 장치는 connection 요청 패킷(CONNECT_REQ)을 보낼 수 있다. Advertiser(즉 페리페럴)가 이 connection 요청 패킷을 받으면 advertising 이벤트를 종료하고 connection 절차를 시작한다. Connection 요청 패킷에는 사용할 채널 리스트와 도약 시퀀스 정보, 연결 구간 타이밍 등의 정보가 들어 있다. 연결 구간 타이밍 정보는 페리페럴 장치가 언제

깨어나야 하는지를 알게 하는 정보로 이는 배터리 수명과 관련된다.

상기 7 가지의 패킷에 의해 BLE의 동작이 설명된다. BLE 장치의 동작을 그림 2에 보인 상태 머신에 의해 나타낼 수 있다. 대부분의 시간 동안 BLE 장치는 'standby' 상태에서 슬립 모드로 있다. 브로드캐스터나 페리페럴은 간헐적으로 깨어나 'advertising' 상태로 넘어가서 advertising 이벤트 동안 데이터를 전송한다. 장치가 깨어나는 것은 정해진 이벤트가 발생하거나 사전 정의된 타이밍에 의해 일어난다. 페리페럴 장치가 'connection' 상태로 일단 들어가면(브로드캐스터는 connection 상태로 들어갈 수 없다) 깊은 슬립 모드로 들어갈 수 있으며, 마스터가 지정해준 시간마다 정규적으로 깨어난다. 센트럴 장치는 standby 상태에 있다가 'scanning' 상태 또는 'initiating' 상태로 갈 수 있다(옵저버 장치는 initiating 상태로 갈 수 없다). Initiating 상태로 가는 것은 connection을 만들기 위한 경우이다.

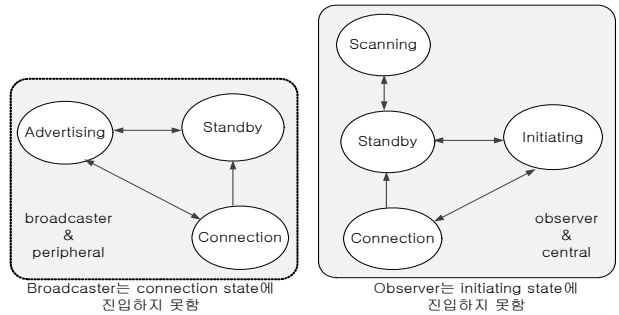


그림 2. BLE 상태 머신
Fig. 2. BLE state machine.

2. 장치 탐색 프로세스

Advertising 모드에 있는 장치, 즉 advertiser는 주기적으로 반복해서 advertising 정보를 보낼 수 있다. Advertiser는 scanning 장치가 세 개의 advertising 채널(채널 인덱스 37, 38, 39) 중 어느 것을 통해 수신하는지 알지 못하므로 보통 세 개의 채널에 순차적으로 advertising 패킷을 전송한다. 그림 3에 advertising 프로세스를 보인다. Advertiser가 advertising 패킷을 전송하는 시구간을 advertising 이벤트(T_a)라 하는데, 한 advertising 이벤트 동안 advertising PDU를 세 개의 advertising 채널을 통해 순차적으로 보낸다. 세 채널에 advertising PDU를 보내고 나면 advertising 장치는 advertising 이벤트를 종료한다. 장치는 동일한 advertising 이벤트를 반복해서 보낼 수도 있고, 새로운 이벤트를

시작할 수도 있다. 연속한 두 advertising 이벤트 간에는 $T_{advEvent}$ (본 논문에서는 T_{AI} 의 변수명을 사용한다)로 정의된 유동 길이의 시간 간격을 둔다. 시간 간격을 두는 이유는 다른 장치가 advertising 채널을 사용할 수 있도록 하기 위해서이다. Advertising 이벤트 간 간격인 $T_{advEvent}$ 는 다시 $advInterval$ 과 $advDelay$ 의 합으로 정의된다. 여기서 $advInterval$ 는 $20ms \sim 10.24s$ 사이의 값으로서 $0.625ms$ 의 정수배를 갖는 고정된 값이며, $advDelay$ 는 $0ms \sim 10ms$ 사이의 의사랜덤한(따라서 유동적인) 값을 가지는데 링크 레이어에서 각 이벤트마다 그 값을 결정한다. Undirected advertising을 보내는 경우(즉 ADV_IND, ADV_NONCONN_IND, 또는 ADV_SCAN_IND) 각 advertising 이벤트 동안 세 채널에 순차적으로 advertising PDU를 보내는데, 연속한 PDU 간의 간격은 $10ms$ 이하가 되어야 한다.

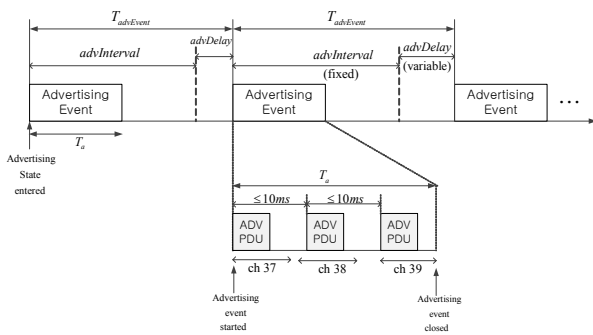


그림 3. Advertising 프로세스와 advertising 이벤트
Fig. 3. Advertising process and advertising even.

한편 scanning 또는 initiating 모드에 있는 장치(scanner 또는 initiator)는 주기적으로 advertising 채널을 스캔하여 advertiser로부터 보내오는 정보 취득을 위한 동작을 한다. 그림 4에 scanning/initiating 프로세스를 보인다. 각 advertising 채널에 대해 일정 시구간 $scanWindow$ (본 논문에서는 T_s 의 변수명을 사용한다) 동안 스캐닝을 하며, 스캔 윈도우 간의 간격은 $scanInterval$ (본 논문에서는 T_{sI} 의 변수명을 사용한다)로 정의된다. 즉 T_{sI} 마다 한 advertising 채널을 스캔하는데, T_s 시구간 동안 스캐닝 동작이 이루어진다. Scanner와 initiator의 스캐닝 프로세스는 동일하며 응대하는 advertising PDU 종류만 다르다. 표준에 의하면 T_{sI} 와 T_s 는 $10.24s$ 이하의 값을 갖도록 되어 있다. Advertiser로부터 ADV_IND PDU를 수신하면 scanner는 SCAN_REQ PDU를 응답으로 advertiser에게 보내서 추가의 정보를 요청할 수 있으며, initiator는 CONNECT_

REQ PDU를 응답으로 보내서 connection 상태로 진입하게 할 수 있다. Advertiser가 ADV_SCAN_IND를 보내는 경우 scanner는 SCAN_REQ를 응답으로 보내 추가 정보를 요청하는데, 복수의 scanner가 있는 환경에서는 여러 scanner가 advertiser에게 응답을 보낼 수 있으므로 충돌이 발생할 수 있다. 충돌을 최소화하기 위해 각 scanner가 응답할 때 back-off 절차를 둔다. Advertiser가 ADV_DIRECT_IND를 보내는 경우에는 해당 initiator는 CONNECT_REQ를 응답으로 보내 connection을 만드는데, 지정된 initiator와 connection을 이루므로 back-off가 필요하지 않다.

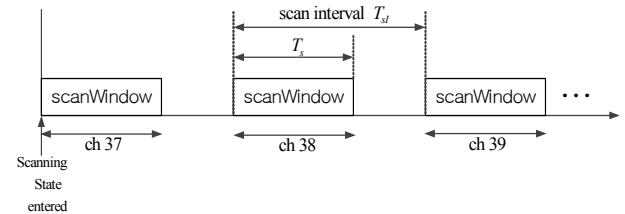


그림 4. Scanning/initiating 프로세스
Fig. 4. Scanning/initiating process.

III. 장치 탐색을 위한 Advertising 횟수의 확률적 분석

본 논문에서는 advertising과 scanning 관련 파라미터의 설정이 장치 탐색 관점에서의 성능에 미치는 영향을 분석한다. 성능 지표로는 장치가 발견될 때까지의 지연 시간(latency), advertising 횟수, 사용 에너지 등을 고려할 수 있다. 구체적으로 지연시간은 advertiser가 처음 advertising 이벤트에 들어가서부터 scanner 또는 initiator가 처음 advertising PDU를 수신할 때까지 소요되는 시간으로 정의한다. 즉 advertiser가 보낸 advertising PDU가 처음으로 스캔 윈도우 안에 들어갈 때까지 걸린 시간이다. Advertising 횟수는 몇 번의 advertising 패킷을 보내야 스캔 윈도우 안에 들어가는지를 의미한다.

지연시간은 실제 응용에서는 중요하지만 선정된 $T_{advEvent}$ 값에 의해 좌우되어 이 값만 가지고는 advertising을 위해 소비하는 에너지를 유추하기 어렵다. 이에 비해 advertising 횟수를 보면 주어진 $T_{advEvent}$ 에 따른 지연 시간을 근사적으로 예측할 수 있고, 사용하는 에너지 정도를 알 수 있다. 이런 이유로 본 논문에서는 advertising 횟수를 장치 탐색 성능지표로 사용하였다. 구체적으로 장치가 발견될 때까지의 advertising 평균 횟수와 advertising 횟수에 대한 누적분포함수(cumulative distribution function

: CDF)를 고려하였다.

본 논문에서는 문제를 단순화하기 위하여 하나의 advertiser와 scanner만 있는 환경을 고려하며, 따라서 패킷의 충돌이 발생하지 않는 것을 가정한다. 또한 BLE 네트워크가 다른 종류의 장치로부터 받는 간섭의 영향도 고려하지 않는다.

그림 5에 장치 탐색 관련 advertising 및 scanning 과정의 예를 보인다. Scanning 과정을 보면 길이가 T_s 인 스캔 윈도우가 주기 T_{sI} 를 갖고 반복된다. Advertising 이벤트는 시각 t_0 부터 시작하며, 길이는 T_a 이고 주기는 T_{aI} 를 갖는다. Advertising 이벤트 시구간에는 채널 37, 38, 39의 advertising PDU가 모두 들어 있으며, scan 윈도우는 순차적으로 advertising 채널 37, 38, 39를 스캔한다. Advertising 이벤트가 스캔 윈도우의 경계에 걸치는 경우, advertising 이벤트 내 세 채널의 PDU 중에서 스캔하고 있는 채널과 일치하는 PDU가 스캔 윈도우 내에 들어 있지만 하면 장치 발견이 성공적이다. 문제를 단순화하기 위하여 advertising 이벤트가 스캔 윈도우에 걸치는 경우 장치 발견이 실패한 것으로 간주하였다. 이렇게 처리한 이유는 스캔 윈도우의 길이에 비해 advertising 이벤트의 길이가 훨씬 작으므로 오차가 크지 않기 때문이다.

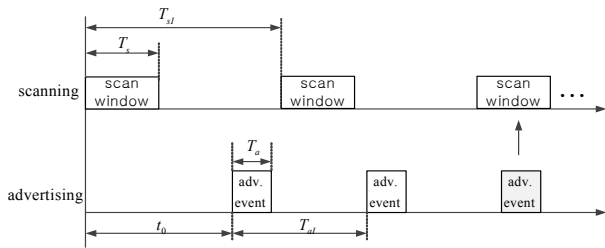


그림 5. BLE 장치 탐색 과정의 예
Fig. 5. An example of BLE device discovery.

장치가 발견될 때까지 advertising 패킷을 전송한 횟수 N 은 최초 advertising 이벤트 발생 시각 t_0 에 의해 확률적으로 결정되며, advertising 및 scanning 파라미터 T_a , T_{aI} , T_s , T_{sI} 의 값에 따라 달라진다. N 번째 advertising 이벤트에서 장치 발견이 되는 경우 지연 시간은 $\tau = (N-1)T_{aI} + T_a$ 가 된다. 최초 advertising 이벤트 $t_0 \leq t \leq t_0 + T_a$ 가 스캔 윈도우 내에 있다면 첫 시도에서 장치 발견이 되며($N=1$), 지연시간은 T_a 가 된다. 최초 advertising 이벤트가 스캔 윈도우에 들어가지 않은 경우, T_{aI} 주기로 반복 전송되는 advertising 패킷이 T_{sI} 주기로 반복되는 스캔 윈도우 내에 들어가면 장치 발견에 성공하게 된다. 그림 5에 보인 예는 세

번째($N=3$) advertising 이벤트가 스캔 윈도우 안에 들어가서 장치 발견이 성공하는 경우이다. 이 경우 지연 시간은 $\tau = 2T_{aI} + T_a$ 가 된다.

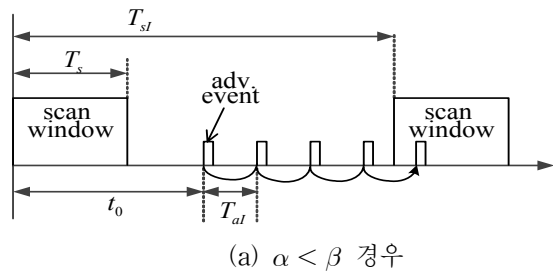
만일 T_{aI} 를 T_{sI} 에 근접하게 설정한 경우에는 첫 advertising에서 장치 발견이 실패하면 영원히 장치 발견이 안 될 수도 있다($N=\infty$). 이와 같이 advertising 및 scanning 파라미터 설정에 따라 장치 탐색 성능이 크게 변화할 수 있으며, N 이 유한한 값으로 수렴한다는 보장이 없다.

이제 N 에 대한 확률적 특성을 살펴보자. 최초 advertising 이벤트 발생 시각 t_0 가 $0 \leq t_0 \leq T_{sI}$ 구간에서 균일한 확률분포로 발생한다고 가정하자. 처음 advertising 이벤트에서 장치가 발견될 확률은 다음과 같이 된다.

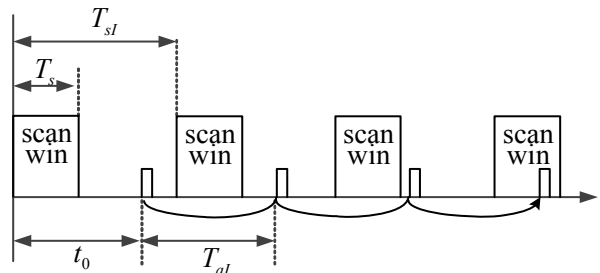
$$P(N=1) = P(0 \leq t_0 \leq T_s - T_a) = \frac{T_s - T_a}{T_{sI}} \quad (1)$$

$N \geq 2$ 의 확률은 T_{aI} 와 T_s 에 대해 두 가지 경우로 나누어 살펴보자. 이하의 분석에서는 위의 두 변수를 T_{sI} 로 정규화한 다음과 같은 변수를 같이 사용한다.

$$\alpha = \frac{T_{aI}}{T_{sI}}, \quad \beta = \frac{T_s}{T_{sI}} \quad (2)$$



(a) $\alpha < \beta$ 경우



(b) $\alpha > \beta$ 경우

그림 6. 장치 탐색의 두 가지 경우
Fig. 6. Two cases of device discovery.

$T_{aI} < T_s$ 인 경우(즉 $\alpha < \beta$ 경우)에는 최초 advertising 이벤트가 스캔 윈도우 안에 들어가지 않으면 다음 스캔 윈도우 안에 들어가는 것이 보장된다. 그림 6(a)에 이 경우를 보인다. $k \geq 2$ 번째 advertising 이벤트에서 장치가 발견될 확률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 P(N=k) &= P(T_{sI} - (k-1)T_{aI} < t_0 < T_{sI} - (k-2)T_{aI}) \\
 &= \frac{T_{aI}}{T_{sI}}, k=2, \dots, N_{\max} - 1 \\
 P(N=N_{\max}) &= \frac{T_{sI} - T_s - (N_{\max} - 2)T_{aI} + T_a}{T_{sI}} \\
 N_{\max} &= \left\lceil \frac{T_{sI} - T_s}{T_{aI}} \right\rceil + 1
 \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 $[x]$ 는 x 보다 작지 않은 최소의 정수로 정의한다. 그러면 N 의 평균값은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E[N] &= \frac{T_s - T_a}{T_{sI}} + \sum_{n=2}^{N_{\max}-1} n \frac{T_{aI}}{T_{sI}} \\
 &\quad + N_{\max} \frac{T_{sI} - T_s - (N_{\max} - 2)T_{aI}}{T_{sI}} \\
 &= \left\{ N_{\max} - \beta(N_{\max} - 1) - \alpha \frac{(N_{\max} - 1)(N_{\max} - 2)}{2} \right\} \\
 &\quad + \frac{(N_{\max} - 1)T_a}{T_{sI}}
 \end{aligned} \tag{4}$$

한편 $T_{aI} > T_s$ 인 경우(즉 $\alpha > \beta$ 경우)에는 최초 advertising 이벤트가 스캔 윈도우 안에 들어가지 않으면 바로 다음 스캔 윈도우 안에 들어가는 것이 보장되지 않는다. 또한 α 가 1에 근접하게 설정되면 스캔 윈도우를 건너 뛸 수 있어서 N 이 매우 커질 수 있으며, $\alpha = 1$ 인 경우에는 $N=1$ 이 되거나 $N=\infty$ 가 된다(첫 시도에서 advertising 패키지가 포획되지 않으면 영원히 포획되지 않는다). 그림 6(b)에 $\alpha > \beta$ 경우 장치 탐색의 예를 보인다. 시각 t_0 에서 시작한 advertising 이벤트가 스캔 윈도우 안에 들어갈 조건은 다음과 같다.

$$t_0 + nT_{aI} \in (mT_{sI} - mT_{sI} + T_s + T_a) \tag{5}$$

여기서 n 과 m 은 0 이상의 정수이다. 이 조건을 만족시키는 최소의 정수에 대해 장치 탐색을 위한 advertising

횟수는 $N=n+1$ 이 된다. 이 조건으로부터 k 번째 advertising 이벤트가 스캔 윈도우 안에 들어갈 확률을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P(N=k) &= P\left(\left\lfloor \frac{t_i}{T_{sI}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{t_i - T_s + T_a}{T_{sI}} \right\rfloor \right) \\
 &\quad t_i = t_0 + (k-1)T_{aI} \\
 &\quad k = 1, 2, \dots
 \end{aligned} \tag{6}$$

여기서 $[x]$ 는 x 를 넘지 않는 최대의 정수로 정의한다. 앞서 언급한 바와 같이 $T_{aI} > T_s$ 의 경우에는 $T_{aI} < T_s$ 의 경우와 달리 N 이 유한값으로 제한된다는 보장이 없으며 α 와 β 의 조건에 따라 달라진다. 또한 N 의 평균값은 닫힌 형태의 수식으로 일반화하기 어렵다. 본 논문에서는 $T_{aI} > T_s$ 의 경우에 대해 컴퓨터 시뮬레이션의 통해 $E[N]$ 을 추정하였다.

그림 7에 $\alpha < \beta$ 인 경우 $E[N]$ 에 대해 식 (4)에 주어진 이론값과 시뮬레이션에 의해 얻은 결과를 보인다. α 가 증가하여 β 에 근접할 때까지 평균 advertising 횟수가 일정하게 감소하는 것을 알 수 있다. $\alpha > \beta$ 의 경우 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 장치 탐색의 성능을 분석한 결과를 그림 8에 보인다. 시뮬레이션에서 사용된 파라미터는 표 1에 정리하여 보인다. 그림 8의 결과를 보면 α 가 1에 근접할수록 $E[N]$ 이 매우 크게 증가하는데 이는 직관적으로 예상 가능한 결과이다. $\alpha < \beta$ 의 경우와 달리 α 에 따른 $E[N]$ 의 일관성 있는 성향이 사라지고 장치 탐색이 불안정한 결과가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 전반적으로 β 가 작을수록, 즉 스캔 윈도우의 듀티 사이클이 작을수록 장치 탐색의 불안정성이 나타나는 것을 알 수 있다.

표 1. 시뮬레이션에 사용된 변수의 값
Table1. Simulation parameter values.

변수	값
T_a	30 ms
T_{aI}	20 ms $\leq T_{aI} \leq$ 10.24 sec
T_s	30 ms $\leq T_s \leq T_{sI}$
T_{sI}	$T_s \leq T_{sI} \leq$ 10.24 sec

장치 탐색 성능을 평가하기 위하여 advertising 횟수 N 에 대한 평균 $E[N]$ 을 지표로 하는 것도 좋지만 확률 변수 N 에 대한 누적분포함수(Cumulative Distribution Function: CDF)를 지표로 하는 것도 큰 의미가 있다.

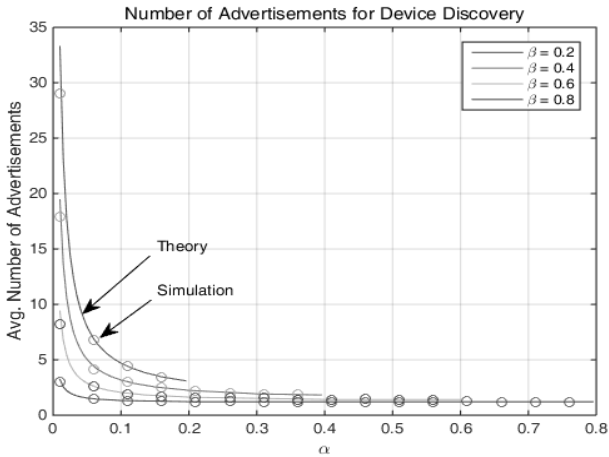


그림 7. 장치 발견을 위한 평균 advertising 횟수($\alpha < \beta$ 경우)

Fig. 7. Average number of advertisements for device discovery ($\alpha < \beta$ case).

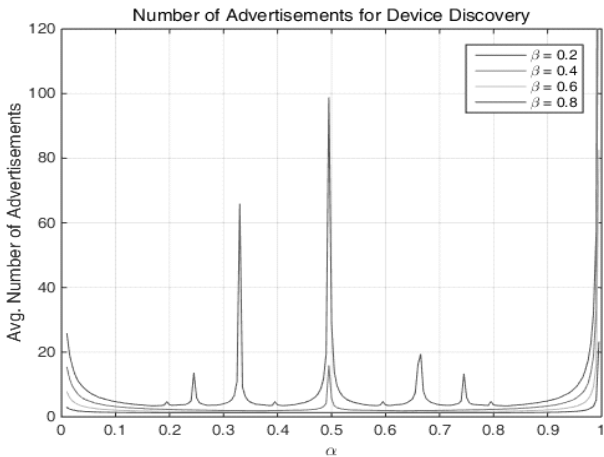


그림 8. 장치 탐색의 불안정성이 얻어진 시뮬레이션 결과
Fig. 8. Simulation results showing instability of device discovery.

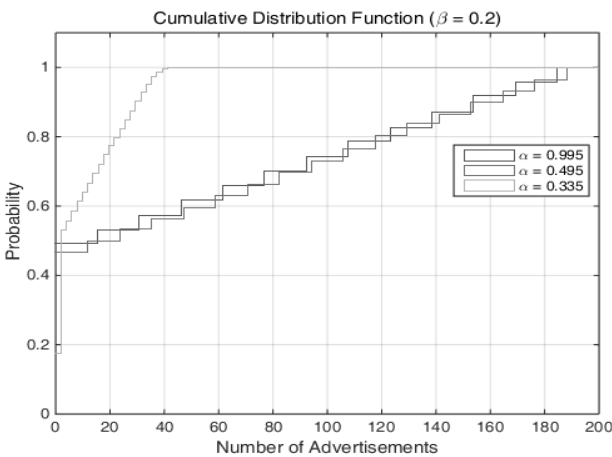


그림 9. Advertising 횟수에 대한 CDF

Fig. 9. CDF of the number of advertisements.

CDF $F_N(k)$ 는 k 번 이하의 advertising으로 장치가 발견될 확률을 의미한다.

그림 9에는 $\beta = 0.2$ 에 대하여 advertising 횟수 N 의 CDF $F_N(k)$ 를 구한 결과를 보인다. $\alpha = 0.495, 0.995$ 의 경우 주어진 확률로 장치가 발견되도록 하는 advertising 횟수가 상당히 크다는 것을 관찰할 수 있다. 작은 α 값 ($\alpha = 0.335$)에서는 작은 횟수의 advertising으로 장치 발견이 이루어질 것이라는 예측이 가능하다.

IV. 장치 탐색 성능 개선을 위한 Advertising 방안

앞 절의 BLE 장치 탐색의 성능 분석에서는 $\alpha < \beta$ (즉 $T_{aI} < T_s$)의 경우 유한한 advertising 횟수 내에서 장치 발견이 보장되며, T_{aI} 를 증가시켜서 T_s 에 이를 때까지 평균 advertising 횟수 $E[N]$ 이 일정하게 감소하는 것을 확인하였다. 그러나 $\alpha > \beta$ (즉 $T_{aI} > T_s$)의 경우에는 $T_{aI} \rightarrow T_s$ (즉 $\alpha \rightarrow 1$)이면 $E[N]$ 이 무한하게 커질 수 있으며, $\alpha \approx 1$ 이 아니어도 $E[N]$ 이 매우 큰 값을 가질 수 있음을 알 수 있었다. 또한 CDF $F_N(k)$ 함수의 N 에 따른 증가율이 상당히 낮은 것을 관찰할 수 있었다. 이번 절에서는 장치 탐색 성능을 개선하는 방안을 모색해 본다.

$\alpha > \beta$ 의 경우 최초의 advertising 이벤트 발생 시각 t_0 에 따라 장치 발견이 이루어질 때까지의 advertising 횟수가 큰 영향을 받는다. Advertising 횟수를 줄이기 위한 방안으로 advertising 이벤트 주기를 감소시키는 방안을 생각할 수 있다. 예를 들어 정해진 시간(또는 advertising 횟수) 내에 scanner로부터 응답을 받지 못하는 경우 T_{aI} 를 감소시키는 방안이다. 이 방식을 사용하면 $E[N]$ 을 줄일 수 있지만 T_{aI} 가 작으면 더 많은 전력을 사용해야 하기 때문에 시간 측면에서의 성능 개선을 보는 대신 에너지 측면에서 손해를 보게 된다. 또한 advertising PDU 중에서는 응답을 받지 않는 것(예를 들면 ADV_NONCONN_IND)도 있어서 이 방안을 적용할 수 없다.

다른 방안으로 advertiser가 특정 횟수(예 20회)의 advertising 패킷을 전송할 때마다 T_{aI} 를 한 번 씩 변화시키는 방법을 고려해 보자. 제안된 방식의 배경은 초기 advertising 이벤트 시각 t_0 가 나쁜 위치에 있으면 $\alpha > \beta$ 의 경우(특히 α 가 큰 경우) 지속적으로 스캔 윈도우를 벗어날 가능성이 많이 있으므로 일정 주기마다 advertising 이벤트 타이밍을 변화시킴으로써 스캔 윈도우

우 내에 들어가게 하자는 것이다. 이 방법은 scanner로부터의 응답과 무관하게 적용 가능하며, 에너지 손실이 거의 없다. 그림 10에 제안된 방식을 적용하고 시뮬레이션을 실행하여 $E[N]$ 를 구한 결과를 보인다. 시뮬레이션 조건은 그림 8이 얻어진 환경과 동일하게 설정하였다. 그림 10에 보인 시뮬레이션에서는 N 이 20의 배수가 될 때마다 한 번씩 $T_{a,I}$ 를 0.75 배로 줄이는 방법을 사용하였다. 그림 8과 비교하여 $E[N]$ 이 많이 감소하는 결과를 볼 수 있다.

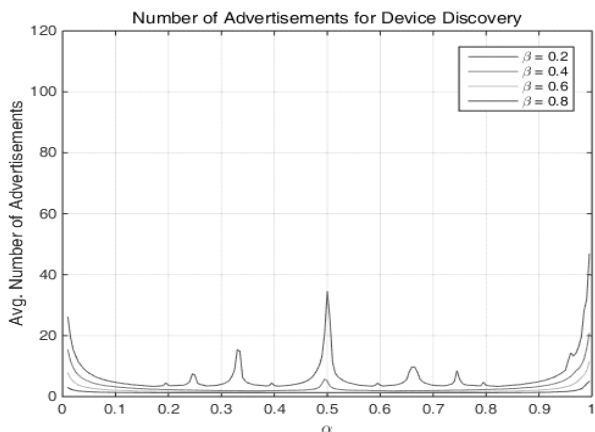


그림 10. 제안된 알고리즘을 사용하여 얻은 평균 advertising 횟수

Fig. 10. Average number of advertisements obtained by using the proposed algorithm.

그림 11에는 제안된 방식을 사용하여 CDF $F_N(k)$ 를 구한 결과를 보인다. 그림 9와 비교하여 주어진 확률로 장치 발견이 이루어질 때까지의 advertising 횟수가 크게 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 이상의 결과에 의해 제안된 방안을 사용하면 BLE 장치 탐색의 성능을 개선할 수 있음을 알 수 있다.

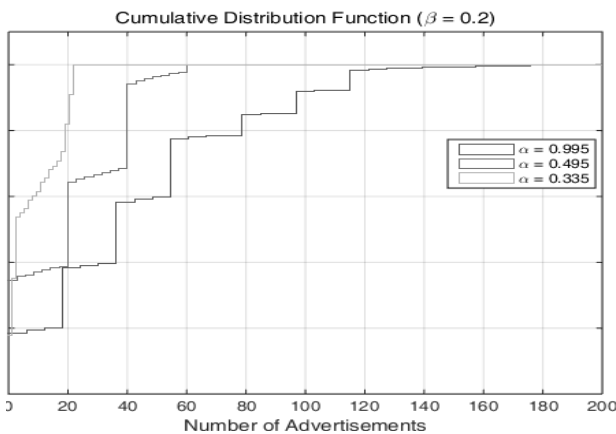


그림 11. 제안된 알고리즘을 사용하여 구한 CDF

Fig. 11. CDF obtained by using the proposed algorithm.

V. 결 론

BLE 기반 무선 네트워크의 운영에 있어 장치 탐색과 관련된 파라미터 값의 적절한 설정을 위해 성능 분석이 필요하다. 본 논문에서는 advertising 채널을 통해 전송되는 패킷의 포획을 위한 advertising 횟수와 관련 파라미터와의 상관 관계에 대해 확률적 분석을 수행하였다. Advertising 이벤트 주기가 스캔 윈도우보다 큰 경우 장치 탐색 성능이 불안정하며, 스캔 듀티사이클이 작을수록 불안정성이 커지는 것을 확인하였다. 소모 에너지 증가가 거의 없으면서 장치 탐색의 성능을 개선할 수 있는 advertising 이벤트 간 간격 제어 방안을 제안하였다. 제안된 방식은 BLE 네트워크 운영에서 응용 조건에 따라 파라미터 설정값을 부여하는 데 참고가 될 것으로 기대된다. 향후 연구에서는 다수의 advertiser와 scanner가 있는 환경에서의 장치 탐색 성능 분석의 수행이 필요하다.

REFERENCES

- [1] Bluetooth SIG, "Bluetooth Core Specification Version 4.0," Jul. 2010.
- [2] ZigBee Alliance, "ZigBee specification," Dec. 2004.
- [3] T. Zhang, J. Lu, and F. Hu, "Bluetooth Low Energy for Wearable Sensor-based Healthcare Systems," Proc. 2014 Health Innovations and Point-of-Care Technologies Conf., Oct., 2014.
- [4] B. Zhou, et. al., "A Bluetooth Low Energy Approach for Monitoring Electrocardiography and Respiration," Proc. 2013 IEEE 15th International Conf. on e-Health Networking, Applications and Services (Healthcom), 2013.
- [5] R. Fazel-Rezai, M. Pauls, and D. Slawinski, "A Low-Cost Biomedical Signal Transceiver based on a Bluetooth Wireless System," Proc. 29th Annual International Conf. of the IEEE EMBS, Aug., 2007.
- [6] W. Bronzi, R. Frank, G. Castignani, and T. Engel, "Bluetooth Low Energy for Inter-Vehicular Communications," Proc. 2014 IEEE Vehicular Networking Conf. (VNC), 2014.
- [7] J.-R. Lin, T. Talty, and O. K. Tonguz, "On the Potential of Bluetooth Low Energy Technology for Vehicular Applications," IEEE Commun. Mag., pp. 267-275, Jan. 2015.
- [8] C. Drula, C. Amza, F. Roussseau, and A. Duda, "Adaptive energy conserving algorithms for neighbor discovery in opportunistic Bluetooth

- networks,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol.25(1), pp. 96–107, Jan. 2007.
- [9] S. Basagni, R. Bruno, and C. Petrioli, “Device Discovery in Bluetooth Networks: A Scatternet Perspective,” Lecture Notes in Computer Science, 2006, Vol. 2345/2006.
- [10] M. Dufлот, M. Kwiatkowska, G. Norman, and D. Parker, “A formal analysis of bluetooth device discovery,” International Journal on Software Tools for Technology Transfer, Vol.8(6), pp. 621–632, 2006.
- [11] J. Liu, C. Chen, and Y. Ma, “Modeling Neighbor Discovery in Bluetooth Low Energy Networks,” IEEE Communications Letters, Vol. 16, No. 9, pp. 1439–1441, Sep. 2012.
- [12] C. Gomez, I. Demirkol, and J. Paradells, “Modeling the Maximum Throughput of Bluetooth Low Energy in an Error-Prone Link,” IEEE Communications Letters, Vol. 15, No. 11, pp. 1187–1189, Nov. 2011.

저 자 소 개



김 명 진(정회원)

1982년 서울대학교 제어계측 공학과
학사 졸업.

1984년 서울대학교 제어계측 공학과
석사 졸업.

1992년 University of Minnesota,
전기공학과 박사 졸업.

1996년~현재 한국외국어대학교 정보통신공학과 교수
<주관심분야: WPAN, 무선통신, 통신신호처리>