

# IoT-WPAN 환경에서 에너지 효율적 음성 데이터 Broadcast 기법

이 재 호\*

## Energy-Efficient Voice Data Broadcast Method in Wireless Personal Area Networks for IoT

Jaeho Lee\*

요 약

무선 개인화 네트워크 환경에서는 통신 장치의 경량화 정책으로 인하여 에너지 효율이 크게 요구되며, 이러한 시장 요구를 만족시키기 위하여 수많은 통신 프로토콜들이 연구되어 왔다. 특히 Bluetooth Low Energy 기술은 Duty Cycle 방식과 주파수 호핑 방식을 모두 채택하여 저전력 통신 기술의 대표 기술로 시장 선점을 주도하고 있다. 하지만 대부분의 저전력 통신 기술들은 Duty Cycle 채택 등의 이유로 Broadcast 통신 방식에서의 신뢰성 문제를 해결하기 힘들다. 본 논문에서는 IoT 환경에서 발생할 수 있는 Broadcast 통신 요구를 Bluetooth Low Energy 환경에서 해결하기 위한 에너지 고효율의 MAC 프로토콜을 제안하고, Master 장치와 Slave 장치의 Broadcast 전송 효율에 대한 분석을 통하여 제안 방식의 객관적 성능을 검증한다.

**Key Words** : Bluetooth, BLE, IoT, Energy Efficiency, Broadcast, MAC

### ABSTRACT

Bluetooth Low Energy (Bluetooth LE) is a representative break-through communication technology for wireless personal area networks on nowadays. In this environment, most of significant performance should be aiming to energy efficiency due to the policy for manufacturing light-weighted communication devices derived from requirement of world IoT market, and many researches have been developed to satisfy this requirement. While Bluetooth LE has been leading the low power communication technology required from the current market by employing duty cycle and frequency hopping approaches, it couldn't address the problem of reliability on broadcast transmissions. The main goal of this paper is aiming to addressing this problem by suggesting a new method. Furthermore analytic evaluations would also be proceeded to find objective results in the view point of broadcast transmission efficiency from Master device.

### I. 서 론

21세기 스마트 기기의 급격한 발달과 폭발적인 수요로 인하여, 현대 사회를 구성하는 대부분의 사용자는 스마트폰을 보유하고 있으며, 또한 스마트 워치와

밴드 등의 초소형 스마트 기기들 또한 그 수요가 급격히 증가하고 있다.

이와 같은 스마트 기기들은 LTE 등의 이동통신망과 Wi-Fi 등을 통한 인터넷 액세스가 현재까지의 주된 목적이었으나, 스마트 밴드와 스마트 워치, 웨어러

\* First Author: Dept. Information and Communications, Seowon University, izeho@seowon.ac.kr, 정희원  
논문번호 : KICS2015-08-249, Received August 11, 2015; Revised October 14, 2015; Accepted November 6, 2015

블 센서 등의 기기와 스마트폰과의 통신을 목적으로 하는 스마트 기기들이 최근 활발히 출시되고 있으며, 걸음걸이에 따른 운동량 측정 기능을 포함하는 운동화나 운동복, 음악감상과 전화통화를 목적으로 하는 헤드셋, 차량 내 개인 스마트폰과 연동되는 카오디오 시스템 등도 개인 영역의 네트워크를 목적으로 개발되고 있다.

이러한 개인 영역의 통신을 사용하는 기기들은 사용성 증가를 위하여 점차적으로 소형화되고 있으며, 이에 따른 배터리 크기와 성능 문제가 제품 성능의 큰 영역을 차지하고 있기 때문에, 기기 사용 시간 증가를 위한 저전력 통신 기술들이 가장 중요한 기술 요소로 자리 잡고 있다.

Bluetooth 표준 기술은 현재까지 사용되는 개인영역 통신 기술 중 가장 널리 보급된 기술이며, 크게 Bluetooth BR/EDR<sup>[1]</sup> (Basic Rate / Enhanced Data Rate)과 Bluetooth LE<sup>[2-4]</sup> (Low Energy)로 분류된다. 이중 Bluetooth LE는 Bluetooth Specification V4.0<sup>[2]</sup> 이후부터 발표된 기술로써 기존 Bluetooth (BR/EDR) 대비 높은 에너지 효율을 목표로 고안되었다. Bluetooth LE 기술은 기존 BR/EDR 방식과는 달리, 데이터 전송 요구가 있을 경우에만 데이터를 전달하는 비동기식 방식과, Connection 유지를 통하여 주기적으로 데이터를 전달하는 동기식 방식을 모두 채택함으로써, 동기식과 비동기식 MAC 프로토콜의 장점을 모두 포함하고 에너지 효율을 향상시켰다.

Bluetooth LE 기술은 기존 Bluetooth BR/EDR에서 주로 음성 데이터 전송을 목적으로 활용하는 SCO(Synchronous Connection-Oriented)<sup>[1]</sup> 채널을 삭제하고 On-demand 데이터 전송을 중심으로 동작한다. 이 기술은 Master 장치와 Slave 장치가 데이터 전송 요구가 발생하는 상황에서만 Connection 절차를 수행하는 형태로 설계되어 있기 때문에, 주기적인 데이터 전송 요구가 지속적으로 발생하는 실시간 Audio Stream 전송에는 적합하지 않다. 즉, Bluetooth LE 기술은 Slave가 데이터 송수신을 요구할 경우에만 Master 장치가 Connection을 일시적으로 생성하고, 비교적 짧은 시간 내에 필요 데이터를 교환한 후 연결을 종료하는 형태를 목적으로 개발되었다.

또한 기존 USN (Ubiquitous Sensor Networks)<sup>[5-10]</sup>에서 연구되던 저전력 MAC 프로토콜에서도, Bluetooth LE와 동일하게 Duty Cycle 방식을 대부분 채택함으로써 데이터 전달과 Standby 상태에서의 전력 소모를 최소화 하여 에너지 효율을 증가시켰다. 하지만 이러한 방식 역시 음성 데이터 전송에는 적합하

지 않으며, 특히 비동기식 MAC 프로토콜일 경우 Broadcast Audio Stream 전송에는 신뢰성 측면에서 전송 성공률이 크게 악화된다.

IoT 환경에서는 다양한 형태의 Audio broadcast 데이터 전송이 요구될 수 있다. 예를 들어 가정용 TV나 태블릿 PC로부터 휴대용 소형 헤드셋이나 이어폰, 스마트 보청기 등으로 Audio 데이터 전송이 요구될 수 있으며, 만약 복수의 사용자가 동일 Audio 데이터를 수신할 경우 Broadcast 형태의 전송 방식이 필요하다. 또한 Broadcast Audio 데이터를 송신하는 싱크 장치가 이동형 장치일 경우, 이 장치에 대한 에너지 효율 또한 필수적으로 요구된다.

현재까지 다양한 형태의 저전력 MAC 프로토콜이 근거리 통신 환경에서 에너지 효율을 높이기 위하여 설계되어 왔지만, Duty Cycle을 범용적으로 적용하는 환경에서는 Broadcast 전송 방식에 대한 신뢰성이 미흡할 수밖에 없다. 따라서 Duty Cycle 환경에서 Broadcast 전송 성공률을 높이기 위하여, 대부분의 저전력 통신에서는 Broadcast 데이터를 여러번 중복 전송하는 방식을 채택하였으며, 이는 Broadcast 데이터를 송신하는 Master 장치나 Coordinator 장치의 에너지 효율을 저해하는 요소가 되었다.

최근 Bluetooth 표준화를 담당하는 Bluetooth SIG에서도 Bluetooth LE 기술에서 Audio 전송 기능을 제공하기 위하여 Isochronous channel 기술을 개발하고 있으며, 공공장소나 홈네트워크 환경을 위하여 Broadcast Audio 데이터 전송 기능을 제공할 계획으로 표준 기술을 개발하고 있다. 하지만, 이 기술 역시 Broadcast 데이터 전송 방식은 4회의 송신 반복 형태로 개발되고 있으며, 이는 앞서 설명한 바와 같이 Master 장치의 에너지 효율을 크게 저해하는 요소가 된다.

한편, IEEE 802.15.4<sup>[11]</sup> 표준 기술을 기반으로 개발된 Zigbee<sup>[12]</sup> 표준 기술은 메쉬 네트워크를 지원하고 있으며, Bluetooth LE 역시 차기 기술에 메쉬 네트워크를 고려하고 있다. 이러한 메쉬 네트워크는, 이웃 노드 탐색과 Link Cost 산출 등을 목적으로 라우팅 계층에서의 Broadcast 데이터 전송이 필수적이다. 하지만 저전력 MAC 프로토콜에서의 Broadcast 전송 신뢰성이 보장되지 않기 때문에 에너지 효율적인 라우팅 구현에 제한이 발생된다.

IoT 환경에서는 스마트워치나 밴드 등이 broadcast 전송 기능을 수행할 수 있고 또한 향후 개발되어 출시될 많은 IoT 제품들이 스마트 기능을 포함하는 초소형 장치로 생산될 수 있다. 따라서 Broadcast 데이터

를 송신하는 장치의 에너지 효율 문제는 향후 지속적으로 요구가 발생되기 때문에, Broadcast 데이터의 단순 반복 전달 방식은 반드시 개선되어야 하며, 이에 대한 새로운 방안을 본 고에서 나타내고자 한다.

## II. 연구 배경

앞서 설명한 바와 같이, 스마트워치 및 스마트폰 등 개인 휴대기기의 소형화가 확산되어 배터리 제약으로 인한 저전력 기술이 크게 증가되고 있으며, 신체에 부착된 센서와 소형 헤드셋 등 개인 통신의 범위 내에 존재하는 통신 장치의 종류와 수량이 증가되고 있기에 저전력 통신 기술의 필요성이 증가되고 있다. 이러한 근거리 WPAN 통신 환경에 적합한 저전력 통신 기술을 위하여, 현재 표준화를 담당하는 Bluetooth SIG는 1km의 원거리 지원과 실내 위치인식 기술, mesh 네트워크, 저전력 Audio 전송 등이 탑재된 Bluetooth 5.0과 그 이후의 차기 버전에 대한 표준을 Bluetooth LE에 중점을 두고 개발하고 있다.

Bluetooth 차기 기술은 Bluetooth SIG<sup>[13]</sup> 내의 Core Spec WG에서 중점적으로 추진하고 있으며, 주로 1km 거리 확장을 위한 Long Range 기술, 위치인식을 위한 Direction Finding과 Indoor Positioning 기술, 그리고 Bluetooth LE를 통한 저전력 Audio 전송을 위한 Isochronous Channel 등의 주요 표준기술 항목을 정의하고 이를 개발하고 있다.

향후 Bluetooth LE의 통신 거리가 확장되고, Bluetooth LE를 통한 저전력 Audio 전송 기술이 완료될 경우, 스마트 홈과 공공지역 방송 등의 다양한 형태로 Broadcast 전송이 요구될 것으로 예상되지만, 여전히 Broadcast 방식에 대한 차별화된 연구는 진행되지 않고 있으며 기존에 보편적으로 사용되는  $n$ 회의 고정적인 Broadcast 재전송 방식이 활용될 예정이다.

표준 기술 외에도 Broadcast 방식에 대한 연구 역시 다양한 형태로 진행되어왔다<sup>[14-16]</sup>. G. Alonso 등의 연구자에 의해 진행된 Broadcast 방식<sup>[14]</sup>, Ad hoc 네트워크 환경에서의 Routing 절차를 위한 Broadcast 방안을 연구하였다. Ad hoc 네트워크에서는 각 노드가 직접적으로 송수신하지 못하는 원거리 노드와의 통신을 위하여 Routing 알고리즘이 중요한 기술 요소이며, 이에 대한 Discovery 등의 기능 구현 시 요구되는 Broadcast 방식을 Single Channel 환경에서 개선하였다. 하지만 이 연구는 많은 수의 통신 노드가 Discovery 동작을 수행할 때 발생하는 Broadcast Collision을 확률적으로 극복하기 위한 방안일 뿐, 신

뢰성이 보장되지 않는 Broadcast 중복전송에 대한 해결책은 제시하지 못했다.

그 밖에 RTS (Request To Send) / CTS (Clear To Send) 패킷 교환을 통하여 Nack 기반의 Broadcast 및 Multicast 데이터 전송 방식을 고안한 연구<sup>[17]</sup>도 진행된 바 있다. 이 방식은 Tone이라는 단순 Waveform 파형을 Nack 신호로 사용하여, 다수의 수신 장치에서 해당 패킷을 수신하지 못한 장치가 Tone을 Nack 형태로 송신 장치에 전달하여 재전송을 유도하는 형태로 연구되었다. 하지만 이 연구에서 Nack로써 활용한 Tone 신호는 데이터 채널과 독립된 채널을 협대역 형태로 할당하는 방식을 사용하기 때문에 Bluetooth 표준 기술에서는 활용이 불가능하다. 또한 다중 수신 장치에서 발생한 Nack의 Collision에 대한 처리가 불명확하고 외부 간섭에 의한 Nack Collision의 구분이 없으며, ISM 대역에서 Bluetooth LE를 활용한 저전력 Audio 전송 환경에서는 모든 데이터 전달마다 발생하는 RTS/CST로 인하여 에너지 효율이 저해될 수 있다.

IEEE 802.15.4 기술을 적용한 Zigbee 네트워크에서의 Broadcast 전송방식을 개선하기 위하여 연구된 On-tree Self-pruning Rebroadcast (OSR)<sup>[15]</sup> 방식은, 멀티홉 환경에서 Broadcast 포워딩에 대한 문제를 해결하였다. 이 연구 역시 2홉 이상의 네트워크 환경에서의 효율적인 방안을 제시하였지만, 단일 전송거리 내에서 신뢰성이 보장되지 않는 Broadcast 방식에 대한 문제를 해결하지 못하며, 결국 단일 통신거리 영역에서는 고정적인 중복 전송 방식을 사용할 수밖에 없다.

저전력 Cyber-Physical 동기화를 위하여 제안된 방식<sup>[16]</sup>은 Two-Way 메시지 교환을 통하여 PBS (Pairwise Broadcast Synchronization) 환경에서의 Clock 동기화 효율을 향상시켰다. 이 방식은 Bluetooth LE를 활용한 Medical 환경을 고려하였으나, MAC 계층에서의 Clock 동기 정확도를 위한 Broadcast 방안을 위하여 고안되었으며, 위 방식들과 동일하게 신뢰적이지 않는 환경에서의 Broadcast 중복전송에 대한 해결과제는 여전히 남겨져있다.

## III. 제안 MAC 프로토콜

### 3.1 전송환경 분석

Bluetooth LE 통신을 활용한 Audio Stream 전송 환경에서의 데이터 발생 특성은 사용되는 Codec의 기술 방식에 의존적이지만, 그림 1과 같이 일반적으로 Audio 정보 발생의 특성상 주기적으로 동일 크기의 데이터가 발생되며 데이터량에 관계없이 일정한

Latency가 필수적으로 보장되어야한다.

보청기나 헤드셋 등을 위한 Audio 전송이 수행되어야 할 경우, Bluetooth LE 기술은 데이터 발생량이 비교적 적기 때문에 높은 에너지 효율을 보유할 수 있기 때문에 종전의 BR/EDR 기술에 비해 장점이 있다. 하지만, Bluetooth LE의 Data Channel 동작방식 자체가 Advertising, Connection 등의 overhead를 지니고 있기에 Audio 전송에 절대적으로 필요한 Latency를 보장할 수 없다.

Audio 정보는 일정 시간 내에서만 전송되어야 정보로서의 가치가 있으며, 일정 시간이 지난 정보는 성공적으로 송신되지 못할 지라도 정보로서의 가치가 없기 때문에 다시 전송할 필요는 없다. 이러한 특성을 만족시키기 위하여 현재 Bluetooth SIG에서는 Codec 개발사를 비롯한 헤드셋 및 보청기 제조사의 주도 하에 Bluetooth LE Audio 전송 기술에 대한 요구 사항을 구체적으로 정의하고 있으며, 현재까지 홉당 Audio 전송 지연 시간을 25ms로 결정하고, 간헐적으로 발생하는 전송 지연을 방지하기 위하여 Codec 방식을 CBR (Constant Bit Rate) 형태로 결정하였다. 이는 Codec으로부터 발생하는 데이터가 항상 일정한 간격으로 생성되며, Bluetooth LE 환경 특성상 에너지 효율을 극대화하기 위하여 125ms 마다 128byte 이하의 데이터 생성 조건을 고려하고 있다.

또한 Audio 정보 발생 특성상 그림 1과 같이 주기적으로 반복되는 일정한 Interval 내에 동일한 크기로 발생되며, 전송 영역 에서는 이러한 Interval 내에 발생된 단위 Audio 정보를 전송한 후 Idle 시간을 갖게 된다. 즉, Audio 정보에 대한 재전송 역시 이러한 Idle 시간 내에서만 진행해야 하며, 다음 Audio 정보가 발생된 후에는 재전송 절차를 계속 진행할 필요가 없다.

한편, Bluetooth LE의 Data Channel Process의 설계 목적 자체가 단발적으로 발생된 데이터를 필요한

경우에만 전송하고 다른 시간 영역에서는 Deep Sleep 을 유도하는 데 있기에, Audio 전송 자체가 Bluetooth LE의 Data Channel Process 목적과 부합되지 힘들다. 따라서, Bluetooth LE 기반의 Audio Streaming 데이터 전송을 위한 새로운 메커니즘이 필요하다.

일반적으로 Broadcast 방식은 신뢰적이지 않으며, 따라서 Broadcast 전송에 대한 신뢰성 확보를 위한 연구는 기존에 충분히 연구되어왔다. 하지만 Bluetooth 환경 특성상 Broadcast 데이터를 송수신하는 장치들의 에너지 자원이 충분하지 않으며, 따라서 Bluetooth SIG에서는 Slave 장치의 에너지 소모를 줄이기 위하여 해당 기술을 개발하고 있다. 그러나 향후 Bluetooth LE를 활용하는 개인영역의 근거리 통신 환경에서는 Broadcast 송신 장치의 소형화가 더욱 활발히 진행될 것으로 예상되며, 따라서 Broadcast 데이터를 송신하는 Master 장치의 에너지 효율 역시 충분히 고려되어야 한다. 본 고는 이러한 기술적 요구에 중점을 두고 Bluetooth Isochronous Channel에서의 Broadcast 데이터 전송 방안을 연구하였다.

### 3.2 Isochronous Channel Operation

본 고에서 제안하는 방식은 Bluetooth LE를 통한 Audio Stream에 대한 Broadcast 전송을 위하여 새롭게 제안하는 기술로써, Bluetooth LE의 에너지 성능을 저해하지 않는 환경에서 Audio Streaming 기능을 수행할 수 있도록 새로운 형태의 전송 방식을 고안하였다.

또한 본 방식은 Bluetooth LE 의 동작 환경을 구성하고 있는 Advertising Channel 및 Data Channel과 독립적으로 운영되며, Audio 데이터 전송을 위한 새로운 채널인 ISO(Isochronous) Channel을 생성한다. ISO Channel 에서는 기존 Advertising Channel 및 Data Channel과 달리, 새로운 Frequency Channel 및 Frequency Hopping Interval을 지닌다. ISO Channel 은 기존의 Adv Channel 및 Data Channel과 더불어 동작할 수 있으며, 이에 대한 동작 상태 천이를 그림 2에 나타내었다.

모든 Bluetooth LE Device는 Advertising Channel 상태에서 필요시 Data Channel을 생성하고, 데이터 송수신이 완료된 후에는 Data Channel을 종료한 후 Advertising Channel로 복귀되는데, ISO Channel 역시 이와 동일 한 형태로 필요에 의하여 생성 및 소멸된다. 즉, Audio Streaming 전송이 필요한 경우 ISO Channel을 생성하고, 해당 전송이 종료된 후에는 생성된 ISO Channel을 소멸시킨다.

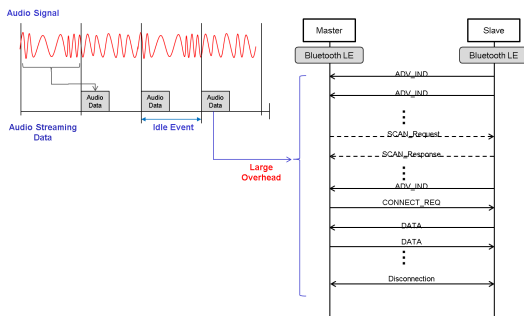


그림 1. Audio 데이터 전송 환경  
Fig. 1. Audio Data Transmission Process

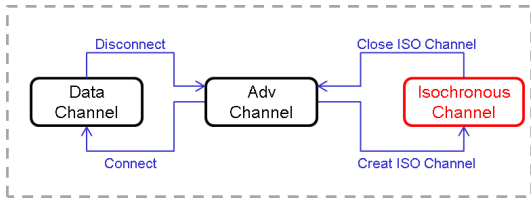


그림 2. Isochronous Channel의 상태 천이  
Fig. 2. State Machine of Isochronous Channel

ISO Channel에서는 Master 장치가 Audio Streaming을 송신하고 Slave 장치는 이를 수신하며, 필요에 의해 Slave 장치가 Master 장치의 제어 하에 데이터를 송신할 수 있다. 이러한 ISO Channel은 그림 3과 같이 Unicast와 Broadcast로 구분된다. 즉, Master 장치는 선택된 소수의 Slave 장치에게 동일 혹은 서로 다른 데이터를 Unicast 형태로 송신할 수 있으며, 경우에 따라 Slave 장치와 양방향으로 송수신할 수 있는 Dual ISO Channel을 생성할 수도 있다.

ISO Channel에서의 Broadcast 방식은 전통적인 Broadcast 송신 방식과 다르게 Multicast의 개념으로 수행된다. 즉, 생성된 ISO Channel에 종속된 Slave에게만 Broadcast 송신을 수행하며, ISO Channel에 종속되지 않는 Slave 장치는 ISO Group Key 등의 개념을 적용하여 해당 Broadcast 음성 정보를 수신하지 못하도록 설계하였다. 물론, 모든 Slave들이 들어야 할 경우, ISO Group Key는 Disable 시킨다.

결과적으로 ISO Channel은 Master 장치에서 필요시 생성되며, 별도의 Frequency Hopping Interval과 별도의 Hopping Pattern을 보유한다. 만약 특정 Master 장치에서 Broadcast Audio 정보 전송이 필요할 경우, 해당 Master 장치는 발생하는 Audio 정보의 크기를 파악하고 이에 적합한 ISO Channel을 생성한 후, 자신의 Advertising Channel에서 이에 대한 정보

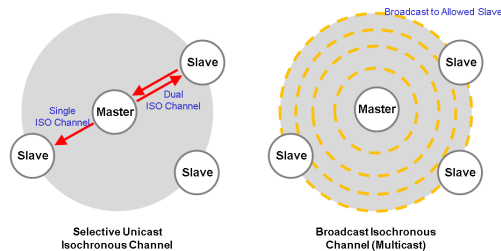


그림 3. Isochronous Channel에서 사용되는 Dual ISO Channel 및 Broadcast Channel  
Fig. 3. Dual Unicast and Broadcast in Isochronous Channel

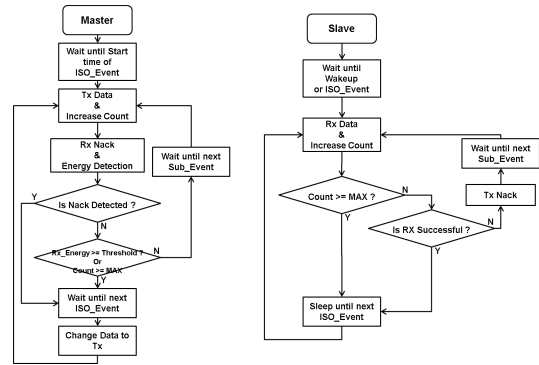


그림 4. 제안하는 Nack 기반의 Broadcast 송신 방식  
Fig. 4. Proposed Nack-Based Broadcast Mechanism

(Hopping Sequence, Interval, Channel Map 등)를 알린다. 이후 Slave 장치는 Master 장치의 Advertising 정보를 수신하여 해당 ISO Channel의 유무를 파악한 후, 이에 대한 스케줄에 따라 해당 Audio 데이터 정보를 수신한다.

### 3.3 Nack 기반의 Broadcast 데이터 전송 방안 설계

Broadcast 전송 방식은 불특정 다수의 수신 노드에 송신하는 절차이기 때문에, 송신 노드가 인지하지 못한 다수의 모든 수신 노드로부터 Ack 패킷을 수신할 수 없다. 따라서 일반적인 Broadcast 전송 방식은 n번 재전송하는 형태로 진행된다. 하지만 이러한 방식은 송신기의 에너지효율을 크게 저해하는 요소가 될 수 있으며, 스마트워치 등의 소형 모바일 장치 등 에너지 자원이 크게 제한적인 장치에는 적합한 방식이 될 수 없다.

제안하는 Broadcast 전송 방안은 이러한 문제를 해결하기 위하여 수신노드로부터 Nack를 수신하고 Ack는 수행하지 않는 형태로 구성된다. 본 방식은 앞서 소개된 n번 재전송하는 일반적인 방식과 달리, Master 장치의 에너지 효율을 높이기 위하여 불필요한 Broadcast 중복 전송을 줄이고자 제안된 기술이다.

제안 방식은 원천적으로 일반적인 WPAN 환경에 모두 적용 가능하지만, Bluetooth LE에 우선 적용하기 위하여 고안된 기술이다. 따라서 네트워크를 구성하는 장치는 단일 Master와 복수 Slave로 분류된다. Slave 장치는 Master 장치로부터 Advertising Channel을 통하여 Master의 Audio Broadcast에 대한 논리적 채널 존재 여부를 파악할 수 있으며, 이를 인지한 경우 해당 Master 장치의 ISO Channel 정보의 Hopping Sequence 및 Hopping Interval 등을 참조하

여 Frequency Hopping 절차를 수행한다.

ISO Channel은 단일 Audio 정보 단위를 기준으로 ISO Event 간격을 설정하고, 단일 ISO Event를 동일한 길이의 Sub Event로  $n$ 회 구성한다. 즉, 하나의 Audio 정보는 하나의 ISO Event와 매칭되며, 세부 구분된 Sub Event 마다 동일 Audio 정보를 필요에 따라 재전송한다. 이때 Frequency Hopping은 Sub Event마다 수행한다.

Slave 장치가 특정 Master 장치의 ISO Channel에 동기화된 경우, Slave 장치는 해당 ISO Event 마다 Wakeup 하여 Broadcast 정보에 대한 수신을 대기한다. 이때 Slave가 Master로부터 성공적으로 정보를 수신한 경우 Slave는 어떠한 패킷도 Master로 송신하지 않으며, 에너지 효율을 위하여 다음 ISO Event까지 Sleep 한다. 반면에 만약 Slave 장치가 Master로부터 Broadcast 정보를 수신하지 못한 경우, Slave 장치는 재전송 요구를 위하여 Nack 패킷을 Master로 송신한 후 다음 Sub Event에 다시 Wakeup 하여 수신을 시도한다.

한편 Master 장치는 해당 ISO Event에 단일 Audio 정보를 Broadcast 형태로 송신하며, 특정 IFS(Inter-Frame Space) 시간이 지난 후 Slave로부터 Nack 수신을 시도한다. 만약 이때 아무런 패킷을 수신하지 못하고 Channel상태가 Idle함을 인지한 경우 Master 장치는 해당 Broadcast 정보가 모든 Slave에게 성공적으로 전달되었다고 간주하며, 다음 ISO Event 까지 Sleep 상태로 진입한다.

또한 만약 Nack 정보를 수신한 경우, Master 장치는 Broadcast 정보를 수신하지 못한 Slave의 존재를

알 수 있으며, 이 경우 동일 ISO Event 내의 Sub Event 시기에 다시 동일 정보를 Broadcast 형태로 재전송 한다. 이러한 Broadcast 재전송은 동일 ISO Event 내에서만 유효하며, 다음 ISO Event가 발생한 경우에는 Audio 정보가 변경되었기 때문에 Broadcast 재전송을 중단하고 새로 발생한 Audio 정보를 Broadcast 형태로 송신한다.

이와 같은 ISO Channel은 Master에 의해서 종료될 수 있으며, 이에 대한 정보는 Master의 Advertising Channel을 통하여 Slave에게 알린다.

### 3.4 Energy-Detect 방식의 Nack 기반 Broadcast 데이터 전송 방안 설계

그림 5는 제안하는 Nack 기반 Broadcast 전송 방식의 예를 나타낸다. 제안 방식에서의 모든 Slave는 자신이 기대하는 Broadcast 정보를 성공적으로 수신한 경우 Sleep 상태로 진입하지만, 반대로 Broadcast 정보를 수신하지 못하거나 충돌 등으로 인하여 해독하지 못한 Broadcast 정보를 수신한 경우 Nack 패킷을 Master에게 전달한다. 한편, Master는 어떠한 Slave로부터라도 Nack를 수신한 경우 해당 정보를 재전송 하고, 그 반대의 경우는 중복 전송을 중단한다.

하지만 임의의 Broadcast 정보를 해당 ISO Event에 성공적으로 수신하지 못한 Slave 장치가 복수일 경우 복수의 Slave 장치는 동일 시각에 Nack 패킷을 송신하게 되며, 이 경우 Nack 패킷의 충돌이 발생하여 Master 장치는 Nack 패킷을 인지하지 못하게 된다.

또한 Wi-Fi, Zigbee, 인근 지역에 존재하는 Bluetooth 또는 Bluetooth LE 등, 동일한 2.4GHz 대

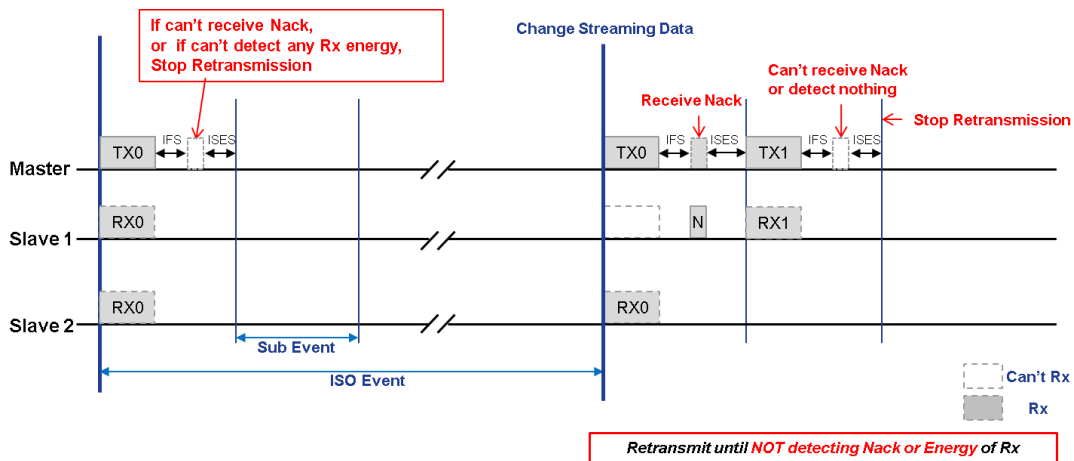


그림 5. Nack 기반의 Broadcast 방식의 예 - Slave 1 장치만 수신하지 못한 경우  
Fig. 5. Example of Proposed Broadcast Mechanism - Case of Rx Failure on Slave 1

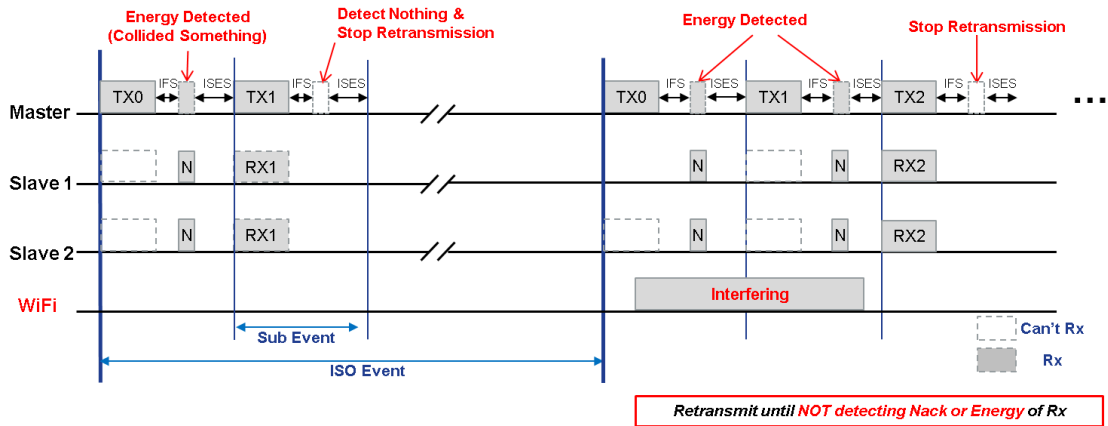


그림 6. Nack 기반의 Broadcast 방식의 예 - 복수 Slave 수신불가 및 외부 주파수 간섭이 발생한 경우  
 Fig. 6. Example of Proposed Broadcast Mechanism - Cases of Rx Failure from External Interference

역을 사용하는 외부 무선 통신이 존재할 경우 역시 Broadcast 송신을 저해하는 간섭 요인이 되며, 이로 인하여 Slave가 송신하는 Nack 역시 간섭을 받아 왜곡이 될 수 있다. 특히 동일 ISM 대역에서 상대적으로 높은 출력으로 데이터를 송신하는 Wi-Fi 환경으로부터 Bluetooth LE는 높은 간섭을 받을 수 있으며, Bluetooth LE의 낮은 송신 출력은 Wi-Fi에 영향을 주기 힘들기 때문에 Wi-Fi의 CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance) 메커니즘이 Bluetooth LE 송신을 회피하지 못할 가능성도 높다. 또한 인근 Bluetooth LE가 서로 간섭을 할 수 있다. 물론 Frequency Hopping으로 인하여 충돌 확률은 낮지만 발생할 확률은 존재한다.

위 환경을 고려할 때, 본 제안 방식에서 외부 간섭에 의한 Nack Collision은 동일 대역의 Wi-Fi에 의하여 발생되거나 또는 근접 지역의 Bluetooth LE로 인한 간섭일 가능성이 높다. 이러한 두 가지에 대한 Nack 충돌에 대비하여 본 고에서는 Master 장치의 Energy Detection 기반의 Broadcast 재전송 절차를 제안한다. 우선 Master 장치는 해당 ISO Event에서 Audio 정보를 Broadcast 형태로 송신한 다음, IFS 구간이 지난 직후에 Energy Detection을 수행한다. 이때 만약 수신 Energy가 감지되지 않을 경우 또는 감지된 Energy가 ED(Energy Detect) Threshold 값보다 작을 경우, 이는 외부 간섭이 없으며 다수의 Slave로 인한 중복된 Nack 충돌 역시 없다고 간주할 수 있다. 따라서 Master 장치는 해당 Broadcast 정보가 성공적으로 전달되었다고 간주하고 재전송을 수행하지 않고 Sleep 상태로 진입한다.

또한 만약 Energy가 감지된 경우 (또는 감지된

Energy가 ED Threshold 보다 클 경우), 이는 Nack가 수신되었거나, 또는 복수 Slave로 인해 Nack 충돌이 발생했거나, 또는 외부 간섭이 발생한 경우이다. 이 모든 경우는 적어도 하나의 Slave 장치가 Broadcast 정보를 수신하지 못한 경우이며, 따라서 Master 장치는 Broadcast 정보를 다음 Sub Event에서 재전송한다.

물론 이 경우에도 오류가 존재한다. 만약 모든 Slave 장치가 Broadcast 정보를 성공적으로 수신한 후 IFS 구간 내에 외부 간섭 발생이 시작된 경우, Master 장치는 모든 Slave가 Broadcast 정보를 수신했음에도 불구하고 Energy Detection에 의하여 다음 Sub Event 구간에서 Broadcast 정보를 재송신하는 오류가 발생한다. 하지만 IFS 구간은 단일 장치의 Tx와 Rx간 Turn Around를 위해 필요한 시간을 의미하기 때문에 일반적으로 매우 짧은 구간으로 설정된다.

Bluetooth LE 규격에서는 이를 150us 값으로 정의하였으며, 따라서 위와 같은 오류의 발생 확률은 매우 낮기 때문에 현실적으로 발생되지 않는다고 간주될 수 있다. 또한 Bluetooth LE의 낮은 송신 출력은 Wi-Fi의 CSMA/CA에 영향을 주기 힘들고, 인근 Bluetooth LE에 의한 간섭일 경우 Bluetooth 기술 특성상 CSMA/CA 동작을 수행하지 않기 때문에 IFS 구간 이전부터 Broadcast 데이터 패킷은 손실되었을 확률이 매우 높기 때문에, 이 두 가지 상황 모두에 대하여 Master 장치는 해당 Broadcast 데이터를 재전송해야 한다.

이와 같은 형태로 Broadcast를 필요에 따라 재전송할 경우 Master 장치의 불필요한 Broadcast 재전송을 막을 수 있기 때문에 Master 장치의 에너지 효율을 극대화 할 수 있다. 또한 Slave의 Ack가 불필요하기 때

문에 불특정 다수의 등록되지 않는 Slave에게도 적용할 수 있으며, 수신 성공률이 전체적으로 좋지 않은 무선 채널 환경에서도 Sub Event 수에 제한을 두어 Master 장치가 Broadcast 정보를 무한 반복 재전송하는 문제도 해결할 수 있다.

#### IV. 성능 평가

Energy Detection을 활용하여 Nack 기반의 Broadcast 정보를 재전송하는 제안 방식은, 고정적으로 재전송하는 기존의 방식에 비하여 Master 장치의 불필요한 재전송 수를 감소시켜 에너지 효율을 향상시킬 수 있다.

제안 방식에서의 Broadcast 재전송 수는 사용 환경에서 요구되는 모든 수신 장치의 수신 성공률에 따라 변동될 수 있지만, 고정적인 Broadcast 재전송 방식은 이에 대한 설정을 동적으로 가변시키기에 어려움이 있다. 즉, 채널 환경이 좋지 않은 환경에서는 Broadcast 재전송수가 증가되어야 하고 반대의 경우는 불필요한 재전송수를 감소시켜야 하지만, 고정 재전송 방식은 이를 적용하기 힘들다.

반면 제안 방식은 이에 대한 적용성이 매우 높기 때문에, 최대 재전송 수를 크게 증가시켜 설정하더라도 채널 환경이 좋을 경우 재전송 수는 동적으로 감소된다. 즉, Busy 채널 환경에의 Master 장치는 설정된 최대 재전송 수까지 Broadcast를 반복 수행하여 다수의 Slave에 대한 수신 성공률을 높일 수 있고 Idle 채널 환경에서는 수신이 성공될 때 까지만 Broadcast 재전송 절차를 수행하기 때문에 Master 장치의 불필요한 에너지 소모를 막을 수 있다.

모든 송수신 장치가 직접 통신 가능 거리에 존재한다고 가정하고 Broadcast를 송신하는 단일의 Master 장치가 존재한다고 가정할 경우, 기존의 고정 재전송 방식에서의 재전송 회수  $N_{TX}$  값은 아래와 같다.

$$N_{TX} = n \tag{1}$$

하지만 본 제안 방식에서의 필요 재전송 수는 기존과 비교할 때 매우 크게 감소됨을 알 수 있다. 우선 단일 Slave에서 하나의 Broadcast 패킷에 대한 수신 성공률을  $p$ 라고 정의하고, 첫 번째 패킷을 성공적으로 받을 확률을  $Q_{(1)}$ , 첫 번째 수신 실패 후 두 번째 수신을 성공할 확률을  $Q_{(2)}$ 라고 정의할 때,  $(n-1)$ 번째까지 모든 패킷 수신을 실패한 후  $n$ 번째 성공할 확률  $Q_{(n)}$ 은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} Q_{(1)} &= p \\ Q_{(2)} &= (1-p)p \\ Q_{(3)} &= (1-p)(1-p)p \\ Q_{(n)} &= (1-p)^{n-1}p \end{aligned} \tag{2}$$

제안 방식의 경우, 단 한 번의 패킷이라도 수신을 성공한 Slave는 에너지 효율을 높이기 위하여 즉시 Sleep 상태에 진입하기 때문에,  $(n-1)$ 번째 수신 성공 이후의  $n$ 번째 성공률은 고려하지 않는다. 따라서  $k$ 개의 Slave 수를 고려할 때  $n$ 번째까지 모든 Slave가 해당 Broadcast 정보를 성공적으로 수신할 확률  $\rho$ 는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \rho &= \left( \sum_{w=1}^n Q_{(w)} \right)^k = \left( p + \sum_{w=2}^n Q_{(w)} \right)^k \\ &= p^k \left\{ 1 + \sum_{w=2}^n (1-p)^{w-1} \right\}^k \end{aligned} \tag{3}$$

제안 방식에서의 Broadcast 재전송 수는 Energy Detection 수행 결과에 의존적으로 결정되며, 따라서 인근 주파수 간섭이 없는 경우 모든 Slave가 성공적으로 Broadcast를 수신하기 위한 필요 재전송 수는  $\rho$  값에 의하여 최적화시킬 수 있다.

본 분석 방식을 적용하여 전체 Slave의 수와 요구되는 전체 Slave 수신 성공률을 고려할 때, 노드 수  $k$ 에 따른 전체 노드 수신 성공률은 그림 7과 같다. Bluetooth LE는 기존 Bluetooth와 같이 동일 주파수 대역의 간섭을 고려하기 위하여 CSMA 대신 Frequency Hopping 동작을 수행한다. 따라서 Bluetooth LE 장치가 인근 Wi-Fi 등의 간섭을 받을

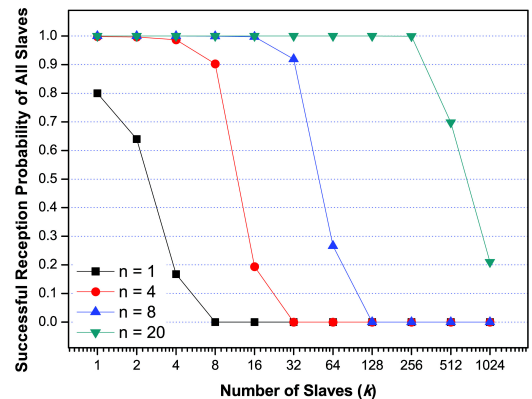


그림 7. Slave 증가에 따른 전체노드 수신 성공률  
Fig. 7. PDR according to Number of Nodes



경우, Frequency Hopping 절차에 따라 간섭 채널을 사용할 수도 있지만 간섭되지 않은 채널을 사용할 수도 있다. 따라서 본 분석에서는 일정 시간 동안의 단일 Broadcast 패킷에 대한 평균 수신 성공률을  $p$ 로 설정한 뒤, 유동적인  $p$  환경에 대한 전체 노드의 수신 성공률을 그림 8과 같이 도출하였다.

기존의 고정 재전송 방식은 환경에 따라 유동적인 Slave당 평균 수신 성공률이 고려되지 않고 재전송 절차를 수행하는 방식이기 때문에, 채널 환경이 양호한 환경에서도 재전송 수가 감소되지 않는다. 반면 제안 방식에서는 이와 같은 환경에서 불필요한 재전송 수가 감소되어 Master 장치의 에너지 효율을 증가시킬 수 있다. 그림 9은 이러한 유동적인 채널 환경에 대하여 두 방식의 Broadcast 패킷 재전송 수를 나타낸 결과이다.

이와 같이 제안 방식은 모든 Slave가 성공적으로 Broadcast를 수신한 경우와 동일 주파수 대역에 외부

간섭이 없을 경우에 대하여 Master의 재전송 절차를 중단시킴으로써, 에너지 효율이 크게 요구되는 저전력 근거리 통신 환경에 대한 효과적인 Broadcast 재전송 방안을 설계하고 이를 검증하였다.

### V. 결론

WPAN 환경에서는 대부분의 통신 장치가 Wakeup 상태와 Sleep 상태를 반복하는 Duty Cycle 방식을 수행한다. 따라서 외부 간섭이 없는 환경이라도 Master 장치는 Slave장치의 Wakeup 상태를 인지하기 힘들며, 따라서 Broadcast 수신 성공률은 저전력 환경에서 일반적으로 보장되기 힘들다.

현재 추진되고 있는 Bluetooth LE Audio 데이터 전송에 대한 표준 기술은 이와 같은 환경을 위하여 Master 장치의 Broadcast 송신을 항상 중복 전송하는  $n$ -Repetition 형태로 개발되고 있다. 하지만 향후 상용화될 Bluetooth LE Master 장치는 현재보다 더욱 소형화되어 개발될 것이 자명하며, 따라서 Bluetooth LE Audio 데이터 전송 환경의 Master장치에 대한 에너지 효율 역시 고려되어야 한다.

본 고에서는 위와 같은 요구를 만족시키기 위하여 Energy-Detection 기반의 새로운 Broadcast 전송 방식을 고안하였으며 Wi-Fi 등 외부 간섭에 따른 제안 방식의 신뢰성을 검증하였다. 또한 전체 네트워크에서 발생하는 Broadcast 재전송 수의 감소를 실험으로 증명하여 Master 장치의 에너지 효율 향상을 나타내었다. 본 제안 방식은 다양한 저전력 통신 환경에 응용이 가능할 것으로 사료되며, 이를 위하여 LPWAN (Low Power Wide Area Networks) 기술에 대한 확장 연구를 진행할 계획이다.

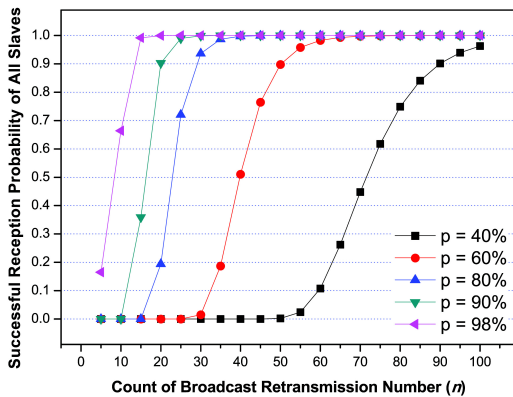


그림 8. Broadcast 전송 수에 따른 전체 수신 성공률  
Fig. 8. PDR according to Number of Broadcasts

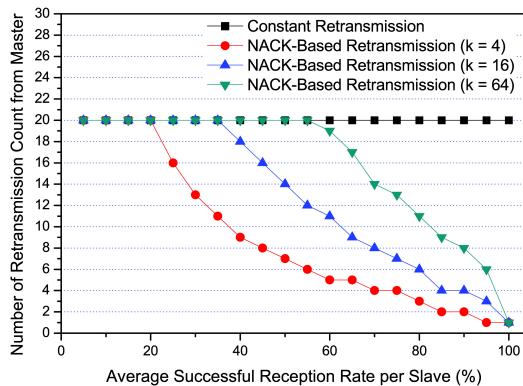


그림 9. 기존 방식과 제안 방식의 재전송 수 비교분석  
Fig. 9. Comparison Results with Previous Approach

### References

- [1] Bluetooth Core Specification 2.1, Bluetooth SIG, Jun. 2007.
- [2] Bluetooth Core Specification 4.0, Bluetooth SIG, Jun. 2010.
- [3] Bluetooth Core Specification 4.1, Bluetooth SIG, Dec. 2013.
- [4] Bluetooth Core Specification 4.2, Bluetooth SIG, Dec. 2014.
- [5] I. Akyildiz, et al., "A survey on sensor networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, no. 8, pp. 102-114, Aug. 2002.

[6] W. Ye, J. S. Heidemann, and D. Estrin, "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," in *Proc. INFOCOM 2002*, pp. 1567-1576, Jun. 2002.

[7] W. Ye, J. S. Heidemann, and D. Estrin, "Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks," in *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 12, no. 3, pp. 493-506, Jun. 2004.

[8] M. Buettner, G. V. Yee, E. Anderson, and R. Han, "X-MAC: A short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks," in *Proc. SENSYS 2006*, pp. 307-320, 2006.

[9] S.-H. Yang, H.-W. Tseng, Eric H.-K. Wu, and G.-H. Chen, "Utilization based duty cycle tuning MAC protocol for wireless sensor networks," *IEEE GLOBECOM 2005*, pp. 3258-3262, 2005.

[10] H. Yoo, M. Shim, and D. Kim, "Dynamic duty-cycle scheduling schemes for energy-harvesting wireless sensor networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 6, no. 2, pp. 202-204, 2012.

[11] IEEE, *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks*, Part 15.4 (Low-Rate Wireless Personal Area Networks), Sept. 2011

[12] Zigbee Specification, Zigbee Alliance Inc., Sept. 2012

[13] <https://Bluetooth.org>

[14] G. Alonso, E. Kranakis, R. Wattenhofer, and P. Widmayer, "Probabilistic protocols for node discovery in ad-hoc, single broadcast channel networks," in *Proc. Parallel and Distrib. Process. Symp.*, Apr. 2003.

[15] G. Ding, Z. Sahinoglu, P. Orlik, J. Zhang, and B. Bhargava, "Tree-based data broadcast in IEEE 802.15. 4 and ZigBee networks," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 5, no. 11, pp. 1561-1574, Nov. 2006.

[16] U. Ghoshdastider, R. Viga, and M. Kraft, "Experimental evaluation of a pairwise broadcast synchronization in a low-power Cyber-physical system," *2015 IEEE Topical*

*Conf. WiSNet*, pp. 50-52, San Diego, CA, Jan. 2015.

[17] S. K. S. Gupta, V. Shankar, and S. Lalwani, "Reliable multicast MAC protocol for wireless LANs," *IEEE ICC'03*, vol. 1, pp. 93-97, May 2003.

[18] J. Lee, "A new routing scheme to reduce traffic in large scale mobile ad-hoc networks through selective on-demand method," *Wirel. Netw.*, vol. 20, no. 5, pp. 1067-1083, 2014.

이 재 호 (Jaeho Lee)



2005년 : 고려대학교 전자컴퓨터공학과 석사

2008년~2013년 : 고려대학교 전기전자전파공학과 박사

2011년~2013년 : 서일대학교 겸임교수

2013년~2015년 : LG전자 차세대표준연구소 선임연구원

2015년~현재 : 서원대학교 정보통신공학과 조교수  
<관심분야> WPAN, 센서네트워크, MANET, MAC, WBAN, Bluetooth, Wi-Fi, ITS, Localization.