

Bluetooth LE를 통한 BR/EDR 핸드오버 환경에서 주파수 중첩 회피를 위한 채널맵 교환 방안

이 재 호*

Channel Map Exchange Method for Frequency Overlap Avoidance in BR/EDR Handover through Bluetooth LE

Jaeho Lee*

요 약

사물인터넷 환경에서는 Bluetooth Low Energy (LE), Bluetooth Basic Rate / Enhanced Data Rate (BR/EDR), Wi-Fi, 5G 등 이기종 무선 통신을 적용하는 다수의 장치가 혼재한다. 이러한 장치들은 대부분 에너지 효율을 중 요시하는 모바일 장치들로 구성되어 있으며 다수의 무선 통신 인터페이스를 지원한다. 따라서 대부분의 모바일 장 치들은 Bluetooth LE와 같은 저전력 인터페이스만을 상시 운영하고 필요에 따라 고속 통신 인터페이스를 활성화 하는 방안이 요구된다. 이러한 특성에 따라 최근 Bluetooth 표준은 Bluetooth LE를 통해 다른 통신 인터페이스를 활성화시키는 기술과 함께 Bluetooth LE를 통한 BR/EDR 접속을 활성화시키는 표준을 발표하였다. 하지만 발표된 규격에서는 Bluetooth LE와 BR/EDR의 채널맵 형태가 크게 다르기에 주파수 중첩 문제가 발생할 수 있다. 본 논 문은 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 Bluetooth LE로부터 BR/EDR 핸드오버 이벤트가 발생될 시점에서 주파 수 중첩 문제를 회피하기 위한 채널맵 교환을 제안하고 이에 대한 정량적 개선 결과를 성능검증을 통해 나타내었 으며, 전송성공률 및 전송속도 측면에서 최소 10~20% 이상의 효과를 검증하였다.

Key Words : Bluetooth LE, BR/EDR, Handover, Frequency Overlap, Channel Map.

ABSTRACT

In the Environment under Internet of Things, multiple devices may coexist with employing heterogeneous wireless communications such as Bluetooth Low Energy (LE), Bluetooth Basic Rate / Enhanced Data Rate (BR/EDR), Wi-Fi, and 5G. Many devices locating on this environment would be composed of mobile devices which require energy efficiency, and they would support multiple wireless communications interfaces. Thus, most of these mobile devices require a method to operate always-on interface mechanism with low-powered interface such as LE, and also to operate on-demand high speed interface by activating it only if required. Considering this issue, Bluetooth standard recently published new specifications which activates other communications interface through Bluetooth LE and establishes BR/EDR connection through Bluetooth LE together. However, the published specifications may have a problem of frequency overlap due to the difference of channel maps between Bluetooth LE and BR/EDR. To address the issue, this paper proposes a method of channel map exchange to avoid frequency overlap problem at the point of handover event incurred from Bluetooth LE to BR/EDR, and shows the enhancements, at least 10 to 20% of quantitatively enhanced results in terms of delivery ratio and throughput, through the evaluations.

* 본 연구는 2021년도 덕성여자대학교 교내연구비 지원에 의해 이루어졌음

• First Author : Duksung Women's University, Department of Software, izho@duksung.ac.kr, 종신회원
논문번호 : 202106-121-B-RN, Received June 4, 2021; Revised July 5, 2021; Accepted July 14, 2021

I. 서 론

사물인터넷 시장의 상용화와 함께 최근 다양한 소형 스마트 제품들이 출시되고 있다. 가정환경을 고려해보면, 스마트폰과 태블릿, TV 등의 고성능 스마트 기기들을 포함하여 스마트 시계나 스마트 스피커 제품 등 다양한 영역까지 스마트 기능들이 탑재되어 있으며, 대부분 Bluetooth나 Wi-Fi 등 무선 인터페이스를 필수 통신 수단으로 활용하고 있다. 스마트 기기 이외에도 무선 헤드폰이나 코드리스 이어폰, 게임패드, 오디오 및 스피커 등의 제품들이 Bluetooth 및 Wi-Fi 무선 통신을 활용하고 있으며, 향후 헬스케어 소형 장치나 실내 측위를 위한 장치의 확산 등을 고려할 때, Bluetooth 및 Wi-Fi 등의 근거리 무선 통신 수단의 활용도는 더욱 높아질 것으로 예측된다.

이러한 소형 제품들은 대부분 스마트폰 등의 스마트 허브 장치에 연결되어 사용되지만, 통신 측면에서 대역폭 등의 요구량이 보편적으로 높지는 않다. 또한, 고속의 데이터 전송이 요구되더라도 사용 요구 시점부터 적용되는 경우가 높기에, 무선 통신을 위한 대기 전력 소모는 에너지 자원이 제한적인 모바일 기기에서 해결에 대한 갈증이 높다.

최근 Bluetooth 표준화 단체인 Bluetooth Special Interest Group (SIG)^[1]에서는 Bluetooth Low Energy(LE)를 상시 대기 용도의 인터페이스로 활용하고 Bluetooth Basic Rate / Enhanced Data Rate (BR/EDR) 및 Wi-Fi 등 비교적 고속의 무선 통신 장치를 데이터 전송이 필요한 시점에서만 활성화하는 표준 기술인 Transport Discovery Service (TDS)^[2] 규격을 2020년 8월에 발표했으며, 동시에 TDS를 기반으로 Bluetooth LE로부터 BR/EDR로 접속 절차를 핸드오버 할 수 있는 BR/EDR Connection Handover Profile^[3] 규격을 발표했다.

본 규격들을 활용할 경우, 스마트폰과 태블릿 등 다중 무선 인터페이스를 지원하는 소형 기기에서 상시 운영 통신 인터페이스로써 Bluetooth LE만을 활성화하고, Wi-Fi 등의 다른 무선 통신 인터페이스를 비활성 함으로써 상시 에너지 효율을 극대화할 수 있다. 또한, 고속의 무선 송수신이 필요할 경우 Bluetooth LE를 통한 핸드오버 기능을 제공함으로써, 필요할 시점에만 On-demand 형태로 이벤트 기반의 고속 송수신을 수행한 후 다시 Bluetooth LE를 유일한 활성 인터페이스로 운영하여 효율을 높일 수 있다.

Bluetooth 표준은 2010년 Bluetooth 4.0^[4] 규격의 LE가 발표된 시점부터 기존 Bluetooth 2.1^[5] 규격의

핵심인 BR/EDR 기술의 표준화가 일부 기능을 제외하고 표준 개발이 정체되어 있다. 물론 2020년에 발표된 Bluetooth 5.2^[6] 규격에서 Isochronous Channel 기술이 공개되어 기존 BR/EDR 규격을 대체할만한 저전력 오디오 기술의 시작을 의미할 수 있지만, 아직까지는 이를 지원할만한 오디오 프로파일 및 코덱의 표준 개발이 완료되지 않았으며, 현재의 Bluetooth 오디오 제품은 아직 BR/EDR에 의존하고 있다.

이러한 관점에서, TDS 및 BR/EDR Connection Handover Profile 규격은 빠른 시기에 상용화될 수 있으며, 또한 매우 유용한 기술이다. 하지만, Bluetooth LE는 근본적으로 BR/EDR 대비 주파수 분배 정책이 Channel Spacing 등의 관점에서 상이하며, Bluetooth에서 공통적으로 사용하는 Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)의 스케줄링 역시 상이하다. 따라서 서로 다른 주파수 할당과 FHSS 스케줄링을 고려하지 않은 Bluetooth LE의 BR/EDR 핸드오버는 높은 확률의 주파수 중첩을 발생시킬 수 있으며, 이는 곧 빈번한 Channel Collision 문제를 확산시켜 무선 통신의 효율을 크게 저하시킬 수 있다.

따라서, 2.4GHz의 동일 주파수 대역을 사용하는 Bluetooth LE 및 BR/EDR의 핸드오버는 향후 Collision 문제를 회피할 수 있도록 상호 채널맵 정보 등을 교환하고 이를 통한 효율적인 핸드오버 기술의 실현이 요구된다. 본 고에서는 에너지 효율적인 운영 시나리오를 위하여, Bluetooth LE를 상시 운영하는 유일한 저전력 무선 인터페이스로 가정하고, 오직 필요한 시점에만 TDS 표준과 BR/EDR Connection Handover Profile 표준을 반영하여 BR/EDR 핸드오버를 수행하는 서비스를 운영 시나리오로 설정한다.

하지만, 앞서 언급한 바와 같이 LE와 BR/EDR의 채널구조가 상이하고 저품질 채널 정보를 전달할 방법이 없기에, 현재의 표준 기술로는 핸드오버에 따른 채널 효율이 낮다. 이러한 문제를 고려하여, 본 고는 TDS 기반의 BR/EDR 핸드오버 수행에 따른 저품질 채널 정보를 핸드오버에 반영하여 채널 효율을 높이는 방안을 제시한다. 또한, Bluetooth LE 및 BR/EDR의 서로 다른 채널구조를 반영하기 위하여, 채널맵 변환 방안을 추가로 제시한다.

II. 연구 배경

Bluetooth 표준은 2007년에 BR/EDR 기술이 포함된 2.1 규격이 발표되면서 스마트폰 시장과 함께 무선 음향기기의 커다란 시장을 생성하였다. 초기

Sub-Band Coding (SBC) 코덱이 탑재된 제품은 사용성이 뛰어나지만, 높지 않은 음질이 문제되었다. 하지만, 이후 고음질의 Advanced Process and Technology eXperiment (AptX) 코덱이 등장하여 무선 음향기기 시장 활성을 증폭시켰고, Advanced Audio Coding (AAC)와 AptX-High Definition (AptX-HD) 등의 초고음질 코덱은 무선 음향기기 시장의 다양한 하이파이 제품들을 탄생시켰다. 이와 같이 Bluetooth BR/EDR은 긴 시간 동안 무선 음향기기 통신 수단의 대표적인 기술로 자리 잡았으며, 오늘날까지 널리 활용되고 있다.

무선 음향기기 상용화 성공과 더불어 Bluetooth BR/EDR은 자동차, 모바일 기기의 근거리 데이터 공유 등으로 성공적인 표준 상용화 실적을 이루었지만, Zigbee 등의 저전력 표준 기술과 비교할 때 에너지 효율이 크게 뛰어나다고 볼 수 없으며, 이러한 기술적 제한으로 인해 Bluetooth 표준은 2010년 LE 기술이 포함된 4.0 발표 이후부터 본격적으로 LE 개발에 집중하였다. 이러한 노력은 Coexistence 및 데이터 전송을 개선하여 2013년 4.1을 발표했고, Advertise Length Extension 및 프라이버시 강화를 지원하는 기능을 포함하여 2014년 4.2를 발표했으며, 원거리 지원과 2Mbps를 지원하는 Bluetooth 5.0 규격을 2016년에 발표했다. 그 후, 실내 측위를 위한 Direction Finding 기능이 포함된 5.1 규격을 2019년에 발표하고, 가장 최근인 2020년에 LE를 통한 오디오 전송 기술인 Isochronous Channel 기술이 포함된 5.2 규격을 발표했다.

Isochronous Channel은 Bluetooth LE를 통한 오디오 전송을 위한 데이터링크 계층의 프로토콜이며, 이 기술의 활성화를 위해서는 이에 적합한 상위 서비스 프로토콜과 프로파일 및 최적화된 코덱이 필요하다. 이러한 관점에서, 향후에는 Bluetooth LE가 기존 BR/EDR의 주요 시장인 무선 음향기기 제품의 주요 오디오 전송 기술이 될 가능성이 존재하지만, 관련 프로파일과 코덱 등의 향후 표준개발 방향에 따라 HiFi 오디오 지원 등의 제약사항이 존재할 수 있으며, 따라서 기존 BR/EDR의 요구는 지속될 것으로 판단된다.

이와 같은 요구로 인하여, 최근 Bluetooth SIG에서는 Bluetooth LE로부터 BR/EDR로 접속 상태가 핸드오버 될 수 있도록 지원하는 BR/EDR Connection Handover Profile 표준이 발표되었으며, 이를 통해 대기전력을 최소화하는 LE의 강점과 하이파이 오디오 전송을 지원하는 BR/EDR의 강점을 모두 포함하는 기술적 시나리오가 가능하다. 이 표준은 Bluetooth LE

기반의 상위 프로파일 표준이며, 동일시기에 발표된 TDS를 활용한다.

하지만, 앞서 기술한 바와 같이 Bluetooth LE와 BR/EDR은 물리계층의 주파수 활용 방법이 서로 다르다. 두 기술 모두 2.4GHz Industry-Science-Medical (ISM) 대역에서 FHSS를 수행하고 있지만, Bluetooth LE는 채널당 대역폭을 나타내는 Channel Spacing이 2MHz이며 총 40개의 채널을 운영하는데 비하여 BR/EDR은 1MHz 대역폭의 채널을 79개로 구분하여 운영한다.

또한 LE는 40개의 채널을 3개의 Advertising Channel과 37개의 Data Channel로 구분하고 Frequency Hopping의 시간적 간격을 Master 장치가 임의로 정하지만, BR/EDR은 79개의 채널을 용도에 따른 구분 없이 625 μ sec (Inquiry 탐색 단계의 경우 312.5 μ sec) 간격으로 Frequency Hopping을 수행한다. 따라서, Bluetooth LE와 BR/EDR을 비교할 때 FHSS 관점에서 채널 관리 방법도 다르고 Frequency Hopping 스케줄링 역시 상이하며, 이러한 이유로 LE로부터 BR/EDR 핸드오버는 상호 주파수 충돌을 발생시킬 수 있다.

한편, 표준기술 이외에도 Bluetooth를 활용한 이기종 통신 인터페이스의 핸드오버 기능은 소수에 의하여 연구되어왔다. 하지만 기존 연구는 주로 SDN 기반의 버티컬 핸드오버를 수행하는 연구⁷⁻¹⁰ 및 사물인터넷 환경에서 모바일 기기 다중접속을 유지한 상태의 인터페이스별 핸드오버를 수행하는 연구¹¹⁻¹³가 대부분이며, 오직 Bluetooth LE를 Always-On 장치로 운영하고 필요에 따라 BR/EDR 등의 인터페이스를 활성화시켜 핸드오버를 수행하는 형태의 핸드오버에 관한 연구는 아직 활발히 진행되지 않는 것으로 판단된다.

III. Bluetooth LE 기반의 핸드오버를 위한 채널맵 교환 방안

3.1 2.4GHz 채널구조의 이질화 문제

2.4GHz ISM 대역을 활용하는 근거리 무선 통신 규격은 대표적으로 IEEE 802.11 기반의 Wi-Fi 표준과 Bluetooth 표준으로 나타낼 수 있으며, Bluetooth 규격의 경우 세부적으로 서로 다른 PHY와 MAC으로 구성되는 BR/EDR 및 LE로 구분된다. 또한, 그림 1과 같이 Wi-Fi와 Bluetooth LE 및 BR/EDR은 동일한 2.4GHz ISM 대역을 사용하고 있지만, 채널의 수와 채널당 점유 주파수가 서로 다르다. 특히 Bluetooth의 경우 LE와 BR/EDR은 채널당 대역폭이 각각 2MHz

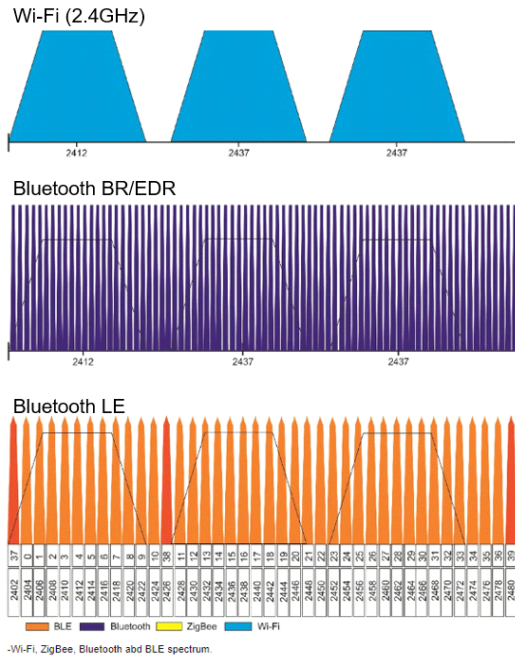


Fig. 1. Channel map comparison in 2.4 GHz spectrum: Wi-Fi, Zigbee, Bluetooth BR/EDR and Bluetooth LE.

와 1MHz로 다르며, 각 채널의 중심 주파수 또한 모든 채널에 대해 매칭되지 않음을 알 수 있다.

Wi-Fi와 Zigbee의 경우는 동일 주파수 대역을 사용하지만 서로 다른 통신 기술이기에 주파수 중첩 현상을 근본적으로 피하기 어렵지만, Bluetooth의 경우 앞서 나타낸 바와 같이 동일 규격 내에 중첩된 기술이기 때문에 BR/EDR과 LE의 사용 주파수 중첩 문제는 해결할 수 있다. 하지만, 이 두 기술은 사용 주파수 대역만 동일할 뿐, 채널 수와 채널별 대역폭, Frequency Hopping 절차 및 시간적 간격 등이 다르며, 채널맵 교환을 위해서는 이원화된 채널맵 변환이 요구된다.

3.2 Bluetooth LE 핸드오버

2020년 8월 발표된 Bluetooth 핸드오버를 위한 TDS 규격을 살펴보면, 그림 2와 같이 Bluetooth LE connection을 유지하는 상태에서 TDS Client는 TDS Server에게 BR/EDR 또는 Wi-Fi 등과 같은 다른 규격의 대체 통신 수단으로 핸드오버를 수행할 수 있다.

이러한 기능은 Bluetooth LE의 상위 계층 프로토콜인 Attribute protocol (ATT)을 활용하며, 사용자가 고속의 데이터 전송 등과 같은 이유로 Bluetooth LE 이외의 통신(Alternate Transport)을 사용할 경우 두 장치는 서로 TDS 사용을 위한 메시지 교환을 수행한

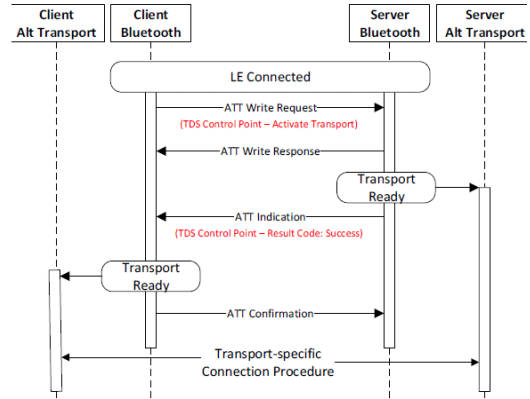


Fig. 2. Example flow of Bluetooth TDS control point [2].

다. 그 후 각자의 Alternate Transport 인터페이스를 활성화하며, 해당 인터페이스 접속을 위한 데이터를 Bluetooth TDS를 통해 교환한 후 Alternate Transport로 접속을 수행한다. 이때, 만일 LE로부터 BR/EDR로 핸드오버를 수행할 경우 BR/EDR Connection Handover Profile 규격을 적용하며, Wi-Fi 등과 같은 다른 통신 방식에서의 핸드오버를 수행하는 경우를 위한 각 통신 규격별 데이터 교환 구조는 정의하지 않았지만 프로토콜 기능적으로는 가능성을 열어 두었다.

3.3 핸드오버를 위한 채널맵 교환

Bluetooth LE는 BR/EDR과 다른 형태로 Adaptive Frequency Hopping (AFH) 기능을 지원하며, Master 장치가 Slave 장치에게 접속을 시도하는 Initiate 단계에서 전달되는 Connect Request 메시지를 살펴보면 그림 3과 같이 채널맵 (ChM) 파라미터가 존재한다. Bluetooth LE의 패킷 프레임은 Preamble과 Access Address 및 PDU 형태의 공통적인 구조를 나타내고 있으며, 접속 절차를 가지는 PDU의 경우 22byte의 파라미터 정보를 포함하고 있고, 이 정보 중 데이터 채널 이동 후 사용할 수 있는 채널 정보를 ChM 파라미터로 정의하고 있다. 이 정보는 Bluetooth LE에서 사용되는 모든 채널마다 1bit씩 매칭되어 Used 또는 Unused 형태로 나타낼 수 있으며, 이를 통해 Slave 장치는 Unused 채널을 Frequency Hopping 수행에서 배제할 수 있다.

결과적으로, Bluetooth LE 규격은 각 장치가 37개의 데이터 채널에 대하여 채널별 품질 상태를 파악하고 관리할 수 있다는 기능을 가정하고 있다. 따라서, 본 고에서 제안하는 방식은 이러한 ChM 파라미터를 기준으로 상태가 좋지 않은 물리적 주파수 대역 정보

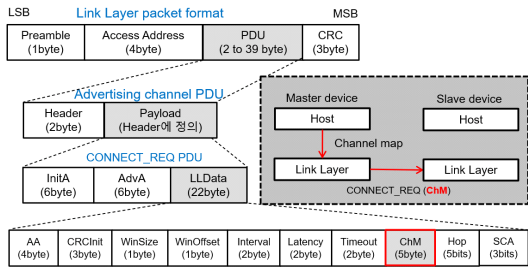


Fig. 3. The parameter of ChM in BLE PDU can be used for channel map exchange scenario.

를 저장한 후, TDS를 통한 핸드오버 수행 시 Alternate Transport에서 사용하는 채널구조로 변환하여 적용할 경우 불필요한 채널 손실을 감소시킬 수 있으며, 이에 대한 대표적 예시를 그림 4에 나타내었다.

본 예시에서의 절차를 간략히 살펴보면, 우선 기기의 Wi-Fi 모듈에서 기본적으로 수행되는 Carrier Sensing 및 Probe Request / Response 절차를 통해 사용 채널의 상태 정보를 파악할 수 있고, 이 정보를 Host 장치는 Bluetooth LE에서 사용하는 각 채널의 상태 정보로 변환하여 적용할 수 있다. 그 후, Bluetooth LE는 TDS 핸드오버를 수행하기 전에 BR/EDR 채널 구조를 참조하여 핸드오버 이후의 채널 상태정보 형태로 채널맵을 변환하고, 이를 토대로 TDS 기반의 BR/EDR 핸드오버를 수행한다. TDS 핸드오버가 수행된 후에는 각 장치가 BR/EDR 인터페이스를 활성화하며, BR/EDR 관점에서 변환된 채널맵을 토대로 Frequency Hopping을 수행하면서 데이터 통신을 진행할 수 있다.

TDS의 효과를 위해서는 각 채널의 상태 정보를 반드시 Bluetooth LE에서 탐색할 필요는 없다. 규격에 따르면 Bluetooth LE는 각 채널에 대해 Carrier Sensing 등을 수행하지 않으며, 채널별 상태 정보는 데이터 교환에서 수집되는 CRC 등의 정보에 의존적

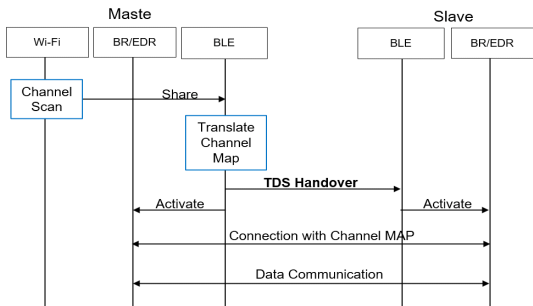


Fig. 4. Example scenario of proposed channel map exchange procedure using TDS process.

이기 때문에, TDS 수행을 위한 Alternate Transport 인터페이스를 활용하는 방안도 효율적일 수 있다.

예를 들어, Bluetooth LE로부터 Wi-Fi로 핸드오버를 수행하는 환경일 경우, TDS 절차에서 Alternate Transport Activation 수행을 위해 Wi-Fi 인터페이스를 활성화하고, 전 채널을 대상으로 Probe Request 및 Probe Response 등의 Wi-Fi 스캔 절차를 수행하여 수집된 채널 정보를 TDS에서 활용할 수 있다.

이 경우, 채널 스캔을 수행한 장치와 TDS를 수행 중인 장치가 동일하기 때문에, Host 내부 메시지 교환 등을 통해 효과적인 구현이 가능할 수 있다. 이때 Wi-Fi를 통해 수집된 채널 정보는 BR/EDR로 핸드오버가 수행되는 환경에서도 활용될 수 있다.

3.4 이기종 인터페이스를 위한 채널맵 변환

본 고에서 제시한 TDS 수행에 따른 채널맵 교환은 Bluetooth LE에서 BR/EDR로 핸드오버를 가정하기 때문에, BR/EDR을 위한 채널맵 변환이 요구된다. 이러한 채널맵 변환을 위해 본 절에서는 Converted Channel Map Sharing (CCMS) 절차를 제안한다.

그림 5는 Bluetooth LE와 BR/EDR의 채널구조 및 변환에 필요한 채널 매칭과 Wi-Fi 등 외부 간섭에 따른 채널 오버랩에 대한 예시를 나타낸다. 현재의 TDS 및 Bluetooth Connection Handover Profile 규격은 채널 정보가 없이 단순히 LE로부터 BR/EDR로 핸드오버를 진행하기에 주파수 간섭에서 피할 수 없다.

하지만, Bluetooth LE의 Master 장치가 현재 사용 중인 Wi-Fi 채널 또는 Congestion이 활발하여 피해야 할 채널 정보를 Wi-Fi 인터페이스를 통해 파악할 경우, 영향을 받을 수 있는 채널 정보를 ChM의 Unused Channel로 설정하여 BR/EDR로 핸드오버를 진행한다면 채널 간섭에서 자유로울 수 있다. 이러한 기능을 수행하기 위해서는 채널 변환 절차가 요구되며, 본 고에서는 아래와 같이 나타내었다.

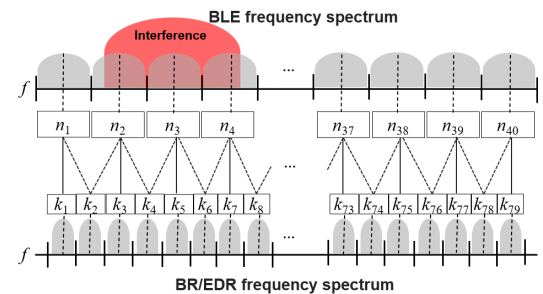


Fig. 5. Conceptual structure of Converted Channel Map Sharing (CCMS).

우선, 그림 5를 살펴보면 Bluetooth LE와 BR/EDR의 채널 인덱스는 약 2배의 관계를 살펴볼 수 있지만, LE와 BR/EDR의 각 채널 공간은 1:2의 매칭을 진행할 수 없다. 즉, LE의 k 채널은 BR/EDR의 $\{2k-2, 2k-1, 2k\}$ 채널과 중첩되며, 이때 $2k-1$ 의 경우 전체 채널 공간이 중첩되고 $2k-2$ 와 $2k$ 채널은 절반의 채널 공간이 중첩됨을 알 수 있다. 따라서, LE로부터 BR/EDR로 핸드오버 되는 시나리오에서 LE의 간섭 채널 k 에 대한 BR/EDR 블랙리스트 채널의 집합은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{C}(k) &= \{2k-2\} \cup \{2k-1\} \cup \{2k\} \\ \text{where } \bar{C}(1) &= \{1, 2\}, \bar{C}(40) = \{78, 79\} \end{aligned} \quad (1)$$

단, LE의 1번과 40번 채널은 Bluetooth 사용 주파수의 최외곽 채널로써 매칭되는 BR/EDR 채널이 2개로 제한적이다.

또한, 반대로 BR/EDR 간섭 채널 n 에 대한 LE의 블랙리스트 채널 집합은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{I}(n) &= \left\{ \frac{(n+1)}{2} \mid n \text{ is odd} \right\} \cup \left\{ \frac{n}{2}, \frac{n}{2} + 1 \mid n \text{ is even} \right\} \\ &= \left\{ \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor \right\} \cup \left\{ \left(\frac{n}{2} + 1 \right) \mid ((n+1) \bmod 2) \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

이러한 채널맵 변환 방법을 활용하여 초기 Bluetooth LE 접속 과정에서 활용되는 ChM 파라미터는 블랙리스트 채널을 고려하여 Unused 형태로 표기하고, 핸드오버 과정에서는 식 (1)과 (2)의 변환 방식을 활용하여 블랙리스트 채널을 전달한 후 이를 통해 AFH 기능을 수행할 경우, 품질 낮은 채널 사용을 회피할 수 있다. 단, 식 (1)과 (2) 및 그림 5에서 나타난 Bluetooth LE 채널은 물리적 채널 인덱스로서, 보편적으로 사용되는 논리채널을 사용할 경우 이에 대한 추가적인 매칭이 요구된다.

채널맵 변환은 Bluetooth LE만을 Always-on 장치로 사용하고, 필요에 따라 TDS 및 Bluetooth Connection Handover Profile 규격을 사용하여 일시적으로 BR/EDR 핸드오버를 수행하는 사용 시나리오를 전제로 수행된다. 즉, BR/EDR이 TDS 요구 시점에만 활성화되며, 그 외의 시간에는 운영되지 않는 환경을 고려한다. 따라서 핸드오버 이후에는 짧은 시간 동안 BR/EDR의 즉시 수행이 요구된다.

만약 핸드오버 이후에 BR/EDR에서의 채널 스캔을

수행할 경우, 본 고에서 제시한 채널맵 변환 방법이 요구되지 않을 수 있다. 하지만, 위와 같은 관점으로 인하여 핸드오버 이후의 채널 스캔은 BR/EDR 수행의 즉시성에 지연을 발생시키며, 추가적으로 기존 BR/EDR 표준의 변경이 요구된다. 따라서, 본 고에서는 Wi-Fi 사용에 따라 주기적으로 관측된 채널 상태 정보를 활용하고, 이 정보를 기반으로 BR/EDR 핸드오버가 요구되는 시점에서 일시적으로 채널맵 변환을 수행하여 TDS에 적용하는 방안을 제시하였다. 이러한 방안은 기존 BR/EDR 표준의 수정이 요구되지 않으며, TDS 절차에서 채널맵 정보만 추가될 경우 수행이 가능하다는 장점이 있다.

IV. 성능 평가

본고에서 제안한 기능은 Bluetooth LE에서 BR/EDR로 TDS 핸드오버를 수행할 경우 품질이 양호하지 않은 채널을 블랙리스트로 설정하여 채널 간섭의 회피 기회를 향상시키는 방법으로써, 현재의 표준 기술을 개선하는 방향으로 제시되었다. 따라서, 이에 대한 표준안이 발표되지 않은 현재 시점에서는 비표준 기능이기에 기존 Bluetooth Controller의 수정이 불가피하게 요구된다. 하지만, 해당 장치를 하드웨어 단계에서 구현하는 방안은 개발환경 등을 고려할 때 접근의 어려움이 발생된다. 본 장에서는 이러한 환경적 제약으로 인하여 시뮬레이션을 통해 제안 방안의 성능 평가를 진행하였다.

본 절에서 사용한 시뮬레이션은 Matlab R2020b를 사용하였으며, 해당 S/W에서 제공하는 Bluetooth LE 및 기존 Bluetooth를 위한 API를 활용하여 TDS 기능을 구현하고, 추가적으로 Simulink에서 제공하는 Bluetooth 5.0 모듈을 활용하였다. 또한, 2.4GHz 대역의 채널 탐색을 위해 Wi-Fi 모듈은 IEEE 802.11n의 2.4GHz 대역만을 사용하였으며, BR/EDR의 Frequency Hopping Sequence는 랜덤하게 생성하였다. 그리고 실험을 위해 발생시킨 BR/EDR 트래픽은 Advanced Audio Distribution Profile (A2DP) 및 Audio/Video Distribution Transport Protocol (AVDTP) 환경으로 생성되었으며, 이때 A2DP 설정에서는 특정 코덱을 위한 설정이 아닌 랜덤 데이터 형태의 트래픽을 Constant Bit Rate (CBR) 방식으로 생성하였다. 또한, 간섭인자 발생을 위해 5대의 Wi-Fi 간섭장치를 서로 다른 주파수에 생성하였으며, 각 실험에서 정의하는 간섭 트래픽의 크기는 위 간섭 장치에서 발생시키는 트래픽의 합으로 정의하였다.

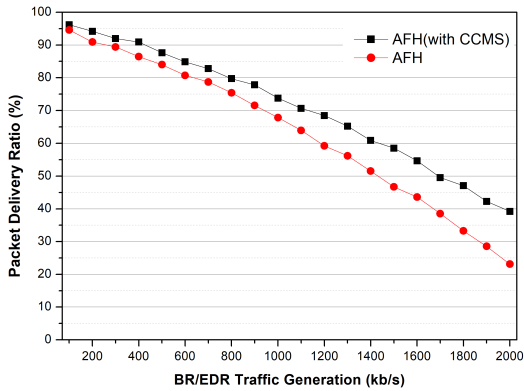


Fig. 6. Results of PDR for variable BR/EDR traffic generation after handover process from LE under low Wi-Fi interference (100kbps).

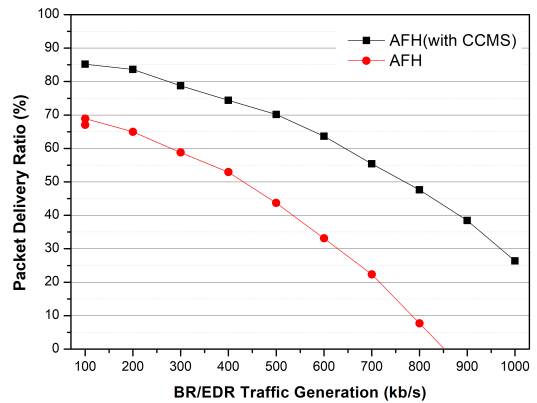


Fig. 7. Results of PDR for variable BR/EDR traffic generation after handover process from LE under high Wi-Fi interference (10Mbps).

우선, 제안 방안은 Bluetooth와 동일한 2.4GHz ISM 대역의 외부 간섭에 따라 성능 개선을 파악할 수 있으며, 본 실험에서는 동일 대역의 간섭을 발생시키기 위해 Wi-Fi 트래픽을 인위적으로 생성하였다. 또한, Wi-Fi 간섭량에 따라 LE에서 BR/EDR로 핸드오버 기능을 수행할 경우에 대한 효과를 정량적으로 측정하기 위하여, Wi-Fi 간섭의 크기를 달리하고 이에 대한 결과를 그림 6과 7에 나타내었다.

그림 6은 외부 간섭이 비교적 적은 환경에서 TDS를 통한 BR/EDR 핸드오버를 수행한 결과를 나타낸다. 이 실험에서의 외부 간섭은 2.4GHz 대역 54Mbps의 Wi-Fi 트래픽을 100kbps로 발생시켜 구성하였으며, 외부 간섭이 발생 되는 상황에서 LE로부터 BR/EDR 핸드오버를 수행하였다. 또한, BR/EDR 관점에서 저품질 채널 회피의 영향을 파악하기 위하여, 채널맵 교환 기능의 유무에 따른 Packet Delivery Ratio(PDR) 결과를 도출하였다.

결과에 따르면 CCMS 기반의 채널맵 교환 방안을 적용한 BR/EDR 핸드오버의 경우 적용하지 않은 결과와 비교할 때 평균 10% 미만의 영향을 볼 수 있다. 이러한 결과는 외부 간섭이 낮은 환경에서 간섭채널을 회피하지 않아도 BR/EDR 데이터 신뢰성이 높게 보장됨을 알 수 있으며, 따라서 CCMS 채널맵 교환 방안의 적용 효과도 높다고 판단하기 어렵다.

하지만, 외부 간섭이 높은 환경에서는 CCMS 기반 채널맵 교환 방안의 효과가 높게 나타난다. 그림 7은 그림 6의 환경과 동일한 조건에서 외부 Wi-Fi 간섭의 크기를 10Mbps로 상향하였으며, CCMS 적용 여부에 따른 결과의 차이는 크게 관측되었다. 즉, 높은 외부 간섭이 발생하는 환경에서는 BR/EDR이 AFH를 통해

선택하는 채널의 영향이 크고, CCMS 기반의 채널맵 교환 방안은 Wi-Fi 간섭으로 인한 저품질 채널을 BR/EDR의 AFH 관점에서 우선 회피할 수 있다. 물론, CCMS를 적용하지 않은 환경에서도 일정 시간이 경과될 경우 BR/EDR의 AFH에 의해 채널 회피가 발생되어 PDR 증가를 도출할 수 있지만, 핸드오버 시점에서의 간섭 채널 중첩 문제에서는 자유로울 수 없다.

보편적인 BR/EDR의 경우 대부분 Bluetooth 오디오 스트리밍 기능에 활용되며, 이러한 서비스 시나리오의 경우 사용되는 Codec의 종류와 설정에 따라 요구되는 BR/EDR 성능이 달라진다¹⁵⁾. 이러한 환경을 파악하기 위하여 본 절에서는 BR/EDR 오디오 스트리밍 Codec에 따른 요구성능을 지난 연구 결과¹⁴⁾를 참조하였다. 또한, 외부 간섭이 발생하는 환경에 대해 오디오 스트리밍 관점에서 요구되는 성능과의 부합 여부를 파악하기 위하여, 별도의 성능실험을 진행하고 결과를 그림 8에 나타내었다.

그림 8과 같이 2.4GHz 대역에서 외부 간섭이 발생할 경우 CCMS 적용에 따른 AFH 성능 결과는 간섭 크기에 따라 차이가 증가된다. 보편적으로 BR/EDR은 필요 이상의 throughput 성능이 필수적으로 요구되진 않지만, 각 Codec별 요구성능을 기준으로 판단할 때 CCMS 적용에 따른 사용자 관점의 성능 차이는 분명히 발생된다. 즉, 보편적으로 사용되는 SBC 4.8K 기준으로 볼 때 700kbps 정도의 throughput 성능이 요구되며, Wi-Fi 등의 외부 간섭이 발생하는 환경에서 CCMS 효과는 존재한다. 물론, AFH 특성에 따라 많은 시간이 경과되면 CCMS를 적용하지 않은 기존의 AFH 성능 역시 향상될 수 있지만, 핸드오버가 수행된 직후의 CCMS 효과는 높다고 판단된다.

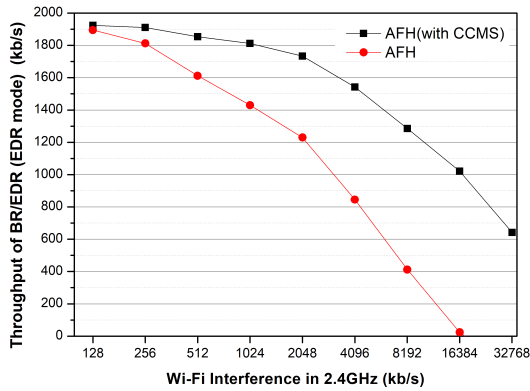


Fig. 8. Results of throughput for BR/EDR after handover from LE for variable Wi-Fi interference.

V. 결론

본 고에서 제안하는 CCMS 기법은 TDS 규격을 기준으로 Bluetooth LE로부터 BR/EDR로 핸드오버가 수행되는 환경에서 LE에서의 채널 상태 정보를 채널맵 변환과정을 거쳐 BR/EDR로 전달하는 방안으로써, 채널맵 변환 방법과 핸드오버에 따른 전달 방법을 제시하였으며, 본 제안 방안에 대한 성능 효과는 시뮬레이션을 통해 검증되었다. 또한, 관련 연구의 지속을 위해 TDS의 서비스 영역이 Wi-Fi로의 핸드오버로 확장될 경우에 따른 효율적 방안을 향후 연구에서 진행할 예정이다.

References

[1] Bluetooth Special Interest Group (SIG), <https://Bluetooth.org>

[2] Transport Discovery Service Specification v1.1, Bluetooth SIG, Jul. 2020.

[3] BR/EDR Connection Handover Profile v1.0, Bluetooth SIG, Jul. 2020.

[4] Vol. 6: Bluetooth Core Specification 4.0, Bluetooth SIG, Jun. 2010.

[5] Bluetooth Core Specification 2.1+EDR, Bluetooth SIG, Jul. 2007.

[6] Vol. 6: Bluetooth Core Specification 5.2, Bluetooth SIG, Jan. 2020.

[7] T. N. Duc and E. Kamioka, "Feasibility of SDN-based vertical handover between bluetooth and Wi-Fi," *ComManTel*, DaNang, Vietnam, 2015.

[8] J. Rizkallah and N. Akkari, "SDN-based vertical handover decision scheme for 5G networks," *MENACOMM*, Jounieh, Lebanon, 2018.

[9] T. N. Duc and E. Kamioka, "An extended SDN controller for handover in heterogeneous wireless network," *APCC*, 2015.

[10] T. N. Duc and E. Kamioka, "EsVHO: Energy saving vertical handover extension for local SDN in non-interconnected environment," *IEICE Trans. Commun.*, 2017.

[11] T. N. Duc and E. Kamioka, "An energy-efficient mobile-controlled vertical handover management for real time services," *J. Comput. and Commun.*, vol. 4, no. 17, 2016.

[12] S. S. Salwe and K. K. Naik, "Discrete image data transmission in heterogeneous wireless network using vertical handover mechanism," *IET Image Processing*, vol. 11, no. 7, 2017.

[13] S. S. Salwe and K. K. Naik, "Heterogeneous wireless network for IoT applications," *IETE Tech. Rev.*, vol. 36, no. 1, 2019.

[14] J. Lee, "Bluetooth-based multichannel streaming protocol model for multi-user environment," *J. KICS*, vol. 23, no. 6, pp. 990-997, Jun. 2020.

[15] J. He, Z. Huang, Y. Hou, and Y. Dong, "Point-to-multipoint stereo audio transmitting system based on bluetooth," *Int. Conf. Commun. and Mobile Comput.*, Shenzhen, pp. 323-328, 2010.

이 재 호 (Jaeho Lee)



2005년 : 고려대학교 전자컴퓨터 공학과 석사
 2008년~2013년 : 고려대학교 전기전자전파공학과 박사
 2013년~2015년 : LG전자 차세대표준연구소 선임연구원
 2015년~2019년 : 서원대학교 정보통신공학과 조교수

2020년~현재 : 덕성여자대학교 소프트웨어전공 조교수
 <관심분야> WPAN, 센서네트워크, MANET, MAC, WBAN, Bluetooth, Wi-Fi, ITS, Localization
 [ORCID:0000-0003-0455-9939]