THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2026 October; 37(10), 961～971.

https://doi.org/10.5515/KJKIEE.2026.37.10.961
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

IEEE 802.15.4ab 기반 차세대 UWB 동향과 기술기준

Next-Generation UWB Trends and Local Regulations based on IEEE 802.15.4ab

장 병 준

Byung-Jun Jang

요 약

최근 IEEE 802.15.4ab 차세대 UWB(ultra-wideband) 표준이 등장하면서 UWB 기술은 기존의 근거리 위치측정을 넘어 장거리 위치측정, 산업용 대규모 위치기반서비스 및 무선센싱 서비스로 활용 범위가 확대되고 있다. 이에 본 논문에서는 IEEE 802.15.4ab의 주요 핵심 기술인 MMS(multi-millisecond sequence), NBA(narrowband assisted) UWB, UWB 저전력 네트워크 기술 및 UWB 센싱 기술을 분석한다. 또한, 유럽의 ETSI와 미국의 FCC를 중심으로 추진되고 있는 국제 UWB 기술기준의 최신 동향도 함께 고찰하였다. 이를 통해, IEEE 802.15.4ab 표준과 국제 기술기준 간의 연관성을 분석하고, 이를 바탕으로 국내 UWB 기술기준의 현황과 향후 고려사항을 제시하였다. 본 논문은 차세대 UWB 기술과 국제 기술기준의 최신 동향을 종합적으로 정리한 기술 리뷰로서, 향후 국내 UWB 기술 및 기술기준 발전을 위한 참고자료로 활용될 것으로 기대된다.

Abstract

With the recent emergence of the IEEE 802.15.4ab next-generation ultra-wideband (UWB) standard, the application scope of UWB technology has expanded beyond conventional short-range positioning to long-range positioning, large-scale industrial location-based services, and wireless sensing services. Accordingly, this study analyzes the key technologies of IEEE 802.15.4ab, including multimillisecond sequence (MMS), narrowband-assisted (NBA) UWB, UWB low-power network technology, and UWB sensing. Furthermore, recent trends in international UWB regulations, primarily driven by the ETSI in Europe and the FCC in the United States, were examined. The relationship between the IEEE 802.15.4ab standard and international regulations was analyzed, and the current status of domestic UWB regulations and future considerations were presented. By comprehensively reviewing the latest advances in next-generation UWB technology and developments in international regulatory frameworks, this study provides a technical and regulatory reference to guide domestic UWB innovation and inform the development of local regulations.

Key words: UWB, IEEE 802.15.4ab, Local Regulation, Localization, Ranging

Ⅰ. 서 론

최근 UWB(ultra-wideband) 기술은 스마트폰과 자동차 스마트키 등의 상용화를 계기로 크게 주목받았으며, 이제는 산업용 사물인터넷(IIoT: industrial internet of things), 실시간 위치추적시스템(RTLS: real time location system),

국민대학교 전자공학부(School of Electrical Engineering, Kookmin University)
· Manuscript received July 7, 2026 ; Revised July 21, 2026 ; Accepted July 22, 2026. (ID No. 20260707-001S)
· Corresponding Author: Byung-Jun Jang (e-mail: bjjang@kookmin.ac.kr)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

스마트팩토리, 자율주행 로봇 등 다양한 분야로 응용 범위가 빠르게 확대되고 있다. 특히 타 무선기술에 비해 수 cm 이내의 거리측정 정밀도로 인해 UWB 기술은 미래의 위치측정 기술의 핵심 플랫폼으로 자리매김하고 있으며, 관련 표준과 산업 생태계 역시 빠르게 발전하고 있다[1],[2].

UWB는 500 MHz 이상의 넓은 대역폭을 이용하여 정밀한 시간 분해능과 우수한 다중경로 분해능을 제공한다. 또한, UWB는 기술기준을 만족하는 범위에서 다양한 응용 서비스에 활용될 수 있다는 장점을 가진다. 이러한 장점으로 인해 초기에는 근거리 무선통신(WPAN: wireless personal area network)과 전통적인 펄스 레이다 응용을 중심으로 연구가 진행되었으며, 디바이스 간 거리측정 기술을 거쳐 현재는 사람의 존재 여부, 움직임, 생체신호 및 주변 환경을 인식할 수 있는 무선센싱 기술로까지 활용 범위가 확대되고 있다. 이에 따라 UWB는 통신, 위치측정 및 무선센싱을 통합적으로 지원하는 차세대 무선 플랫폼으로 발전하고 있으며, 미래 스마트 공간을 구현하기 위한 핵심 기반기술로 주목받고 있다[3],[4].

이러한 최신 산업적 요구를 반영하여 IEEE에서는 차세대 UWB 표준인 IEEE 802.15.4ab를 개발하고 있다. IEEE 802.15.4ab는 2020년 발표된 기존 IEEE 802.15.4z의 안전한 거리측정 기능을 계승하면서 MMS(multi-millisecond sequence), NBA(narrowband assisted) UWB, one-to-many ranging, UWB wireless sensing, wake-up radio 등 다양한 기능을 새롭게 도입하고 있다. 그림 1에 UWB 표준의 주요 특징과 진화 과정을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 IEEE 802.15.4ab 표준은 향후 UWB 기술 및 서비스의 발전 방향을 제시하는 중요한 차세대 표준으로 평가되고 있다[5]~[7].

또한, 차세대 UWB 기술의 발전과 함께 다양한 산업체 표준도 출현되고 있다. IEEE UWB 표준이 물리(PHY) 계층과 MAC(media access control) 계층 중심인데 반하여, 상위계층 및 응용의 표준화를 위하여 FiRa consortium, CCC(car connectivity consortium), Omlox 등의 표준단체를 중심으로 상호운용성과 응용 서비스 확대를 위한 표준화 활동이 활발히 진행되고 있다[8],[9].

이에 따라 각국의 기술기준 역시 이러한 표준의 출현을 수용할 수 있도록 긴밀하게 대응하고 있다. 유럽의

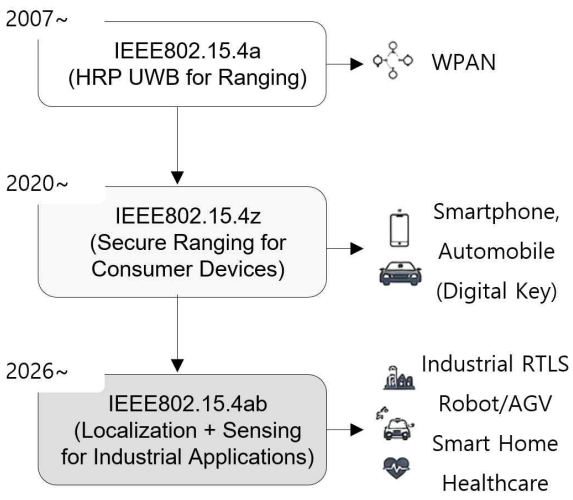


그림 1. UWB 기술의 진화
Fig. 1. Evolution of UWB Technology.

ETSI에서는 enhanced indoor device를 위한 새로운 기술기준을 도입하여 평균 출력(−31.3 dBm/MHz)과 첨두 출력(10 dBm/50 MHz)을 기존 기술기준보다 10 dB 상향하였고, indoor infrastructure, duty cycle 및 identifiable network와 같은 새로운 UWB 운용 개념을 제시하였다. 미국에서도 새로운 산업 응용을 지원하기 위한 UWB 운용 방식에 대한 규제 검토가 지속적으로 이루어지고 있다[10],[11]. 대표적으로 전기차 무선충전 정렬 응용을 위해 기존에 실내 사용으로 제한되었던 UWB의 실외 운용을 허용한 FCC 승인 사례가 있다.

이와 같이 최근 UWB 기술은 IEEE 표준, 산업 생태계 및 각국의 기술기준이 상호 연계되면서 발전하고 있다는 점에서 과거와는 다른 양상을 보이고 있다. 반면 국내 UWB 기술기준은 UWB 기술이 국내에 처음 도입되던 시기에 제정된 이후 큰 변화 없이 유지되고 있다. 다행히 IEEE 802.15.4z 표준을 수용하기 위해 스마트폰에 UWB 사용 허가는 이루어졌으나, 최근 IEEE 802.15.4ab 기반 UWB 표준의 변화 및 국제적인 기술기준의 변화는 반영하지 못하고 있다. 따라서 차세대 UWB 기술을 이해하고 향후 국내 기술기준의 발전 방향을 검토하기 위해서는 IEEE 802.15.4ab 기반 기술과 국제 표준화 및 각국의 기술기준 동향을 종합적으로 분석할 필요가 있다.

이에 본 논문에서는 IEEE 802.15.4ab 기반 차세대

UWB 기술의 주요 특징과 핵심 기술을 소개하고, 국제 표준화 및 기술기준의 최신 동향을 분석한다. 먼저, Ⅱ장에서는 IEEE 802.15.4ab의 개발 배경과 PHY/MAC 기술, UWB 무선센싱 기술 및 주요 응용 서비스를 살펴본다. 다음으로 Ⅲ장에서는 FCC와 ETSI를 중심으로 한 국제 기술기준 변화와 국내 UWB 기술기준의 현황을 살펴보고, 국제 기술기준과의 비교를 통해 향후 국내에서 차세대 UWB 기술 적용을 위해 고려해야 할 기술적, 제도적 사항을 고찰한다. 마지막으로 Ⅳ장에서는 본 논문의 주요 내용을 요약하고 시사점을 제시한다.

Ⅱ. IEEE 802.15.4ab 기반 차세대 UWB 기술

2-1 IEEE 802.15.4ab 표준 등장 배경

그림 1에서처럼 IEEE 802.15.4 기반 UWB 기술은 2007년 IEEE 802.15.4a 표준이 제정되면서 본격적으로 상용화를 위한 기반이 마련되었다. IEEE 802.15.4a에서는 높은 시간 분해능을 이용한 정밀 거리측정과 저전력 무선통신을 목표로 HRP(high rate pulse) UWB PHY가 처음으로 도입되었으며, 이 기술은 다양한 실시간 위치추적시스템과 자산관리 시스템에 적용되기 시작하였다. 이후 스마트폰과 자동차 산업에서 UWB 기반 digital key와 secure ranging에 대한 요구가 증가함에 따라 2020년 IEEE 802.15.4z를 제정하여 HRP UWB 기술에 STS(scrambled timestamp sequence)를 이용한 보안 거리측정 기능을 추가하였다. 이에 따라 IEEE 802.15.4z 표준은 Apple, Samsung 등 스마트폰 생태계와 CCC(car connectivity consortium)의 자동차용 digital key 표준에 채택되면서 UWB 기술의 대중화를 이끄는 계기가 되었다.

그러나 IEEE 802.15.4z는 주로 1:1 거리측정을 중심으로 설계되어 있어 산업용 RTLS와 같이 다수의 단말을 동시에 지원하는 환경에서는 통신 효율과 확장성에 한계가 있었다. 또한 최근에는 위치측정뿐 아니라 사람의 존재 여부, 움직임 및 환경 인식을 위한 UWB 무선센싱에 대한 관심이 증가하면서 기존 표준으로는 새로운 산업적 요구를 충분히 수용하기 어려워졌다. 이러한 요구를 반영하여 IEEE에서는 차세대 UWB 표준인 IEEE 802.15.4ab를 개발하고 있으며 현재 IEEE P802.15.4ab Draft 표준이 최종 제정 단계에 있다. IEEE 802.15.4ab는 기존 HRP UWB PHY를 기반으로 하면서 MMS, NBA UWB, one-to-many ranging, UWB sensing 및 wake-up radio 등 다양한 기능을 추가하여 대규모 산업용 네트워크와 차세대 센싱 서비스를 지원하도록 확장되었다. 이에 따라 IEEE 802.15.4ab 표준은 기존의 위치측정 중심 UWB를 통신, 위치측정 및 센싱이 통합된 플랫폼으로 발전시킴으로써 차세대 UWB 산업 생태계의 기반 표준이 될 것으로 기대된다. 표 1에 기존 IEEE 802.15.4z 표준과 IEEE 802.15.4ab 표준의 특성을 비교하여 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 IEEE 802.15.4ab 표준은 IEEE 802.15.4z 표준이 UWB의 대중화를 이끌었듯이 다시 한번 UWB 기술의 큰 도약을 이끌 것으로 전망된다[12].

2-2 IEEE 802.15.4ab 링크 성능 향상 기술: MMS

기존 IEEE 802.15.4z 기반 HRP UWB 시스템은 짧은 펄스열을 이용하여 높은 거리측정 정확도를 제공하지만, 제한된 송신 시간으로 인해 링크 버짓(link budget) 향상에는 한계가 있었다. 이러한 특성은 스마트폰 기반의 근거리 위치측정이나 digital key와 같이 짧은 거리에서의 정밀한

표 1. IEEE 802.15.4z와 802.15.4ab 표준의 비교
Table 1. Comparison of IEEE 802.15.4z and 802.15.4ab.

Feature	IEEE 802.15.4z	IEEE 802.15.4ab
PHY	HRP UWB	Enhanced HRP UWB (MMS, NBA, wake-up radio)
Ranging	1:1 ranging (TWR)	1:1 / one-to-many
Security	Secure ranging (STS)	Secure ranging (STS)
Scalability	Limited	Enhanced (one-to-many modes)
Sensing	Not supported	Standardized UWB sensing
Low power	Not supported	Wake-up radio
Synchronization	UWB only	Narrowband assisted (NBA)
Target applications	Consumer, digital key	Industrial RTLS, IoT, wireless sensing

거리측정이 필요한 응용에는 충분하지만, 산업용 RTLS, 스마트팩토리, 물류창고와 같이 넓은 공간에서 위치측정을 요구하는 환경에서는 통신반경이 제한되는 요인으로 작용하고 있다[13].

이에 IEEE 802.15.4ab에서는 링크 버짓 향상을 위해 MMS 개념을 새롭게 도입하였다. MMS는 단일 HRP UWB 패킷의 길이를 확장하는 방식이 아니라, 여러 개의 ranging sequence를 수 ms 동안 연속적으로 교환하고 수신기에서 이를 coherent integration함으로써 처리이득(processing gain)을 확보하는 기술이다. 이를 통해 수신 신호대 잡음비(SNR: signal-to-noise ratio)를 향상시키고 시스템 링크 버짓을 증가시켜 기존 IEEE 802.15.4z보다 더 긴 거리에서도 안정적인 거리측정이 가능하도록 한다.

그림 2는 일대일 거리측정 시 기존 HRP UWB의 거리측정을 위한 패킷 교환 방법과 MMS의 패킷 교환 개념을 비교한 것이다[14]. 왼쪽에 나타난 기존 UWB 표준에서는 거리 측정의 기준을 poll-response-final의 3개의 패킷을 사용하는 데 반하여, MMS에서는 response 이후 report 이전에 MMS를 위한 RSF(ranging sequence frame)와 RIF (ranging integration frame)의 연속적인 교환 절차가 추가된다. 이때 응용 환경에 따라 RSF와 RIF 패킷 수를 0에서 8까지 조절하여 사용할 수 있다. 수신기는 수신된 RSF와 RIF의 상관출력을 coherent integration함으로써 링크 버짓

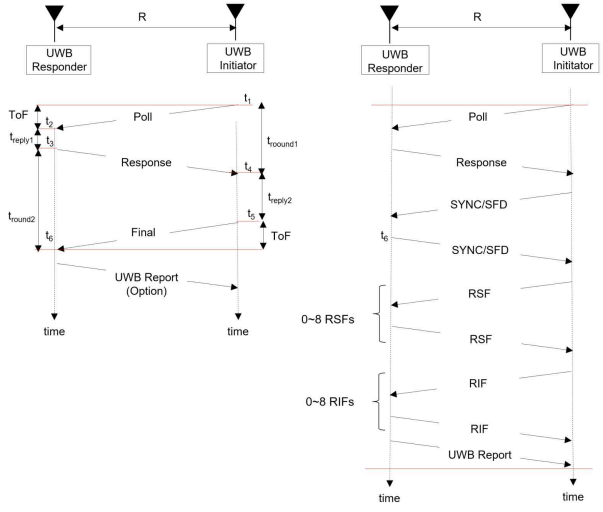


그림 2. UWB MMS와 동작원리
Fig. 2. Operating principle of UWB MMS.

을 향상시킨다. 즉 장거리에 있는 UWB 기기의 거리 측정에서는 RSF와 RIF 패킷 수를 늘리고 가까이 있는 경우에는 줄이는 방식을 사용할 수 있다. 이러한 방식으로 다양한 링크 버짓 요구사항과 응용 환경에 유연하게 대응할 수 있다. UWB 수신기에서는 송신기가 보낸 여러 개의 MMS 시퀀스에 대한 수신 신호를 coherent integration하여 신호를 수신하게 되며, 이를 통해 송신 전력을 증가시키지 않으면서도 유효 수신 SNR을 향상시킬 수 있다. 따라서, 기술기준으로 평균 출력이 1 ms에서 −41.3 dBm/MHz의 제한이 유지되는 환경에서도 링크 성능을 향상시킬 수 있다.

MMS에 의한 이상적인 처리 이득은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$G_{MMS} = 10\log_{10}\left(\frac{T_{MMS}}{T_0}\right) \tag{1}$$

여기서 T_0는 IEEE 802.15.4z HRP UWB 패킷의 기준 적분시간(coherent integration time)이고 T_{MMS}는 MMS를 통해 확장된 적분시간이 된다. 예를 들어 T_0가 1 ms이고 MMS를 통해 10 ms로 확장하는 경우 10 dB의 수신 처리이득(processing gain)을 얻을 수 있다. 이러한 처리 이득은 링크 버짓 향상으로 이어지며, 거리측정이 가능한 통신반경의 증가로 이어질 수 있다. 이제 식 (2)와 같이 Friis 전송공식을 이용한 자유공간 전파손실(PL: path loss)을 가정하면 링크 버짓이 10 dB 증가할 경우 약 3.16배의 거리 증가를 기대할 수 있다. 다만 실제 환경에서는 다중경로, NLOS, 클록 오차, 주파수 오프셋, 이동체에 의한 채널 시간 변화 및 규제상 duty cycle 제한 등에 의해 이론적인 이득이 모두 실현되지는 않을 수 있다.

$$PL = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) \tag{2}$$

MMS는 기존 IEEE 802.15.4z와 동일한 대역폭을 사용하므로 이론적인 거리 분해능(range resolution)은 변화하지 않는다. 대신 coherent integration에 의해 수신 SNR과 링크 버짓을 향상시켜 장거리에서도 안정적인 거리측정을 가능하게 한다. 따라서 MMS의 주요 목적은 거리 분해능 향상이 아니라 장거리 RTLS와 산업용 UWB 서비스 지원에 있다.

2-3 IEEE 802.15.4ab 네트워크 제어 및 저전력 기술

IEEE 802.15.4ab는 MMS를 이용한 장거리에서 링크 성능의 향상뿐만 아니라 대규모 UWB 네트워크의 확장성과 저전력 운용을 지원하기 위한 다양한 MAC 및 네트워크 기술을 새롭게 도입하였다. 기존 IEEE 802.15.4z에서는 HRP UWB PHY만을 이용하여 거리측정과 네트워크 제어를 동시에 수행하였으나, IEEE 802.15.4ab에서는 협대역(narrowband) PHY와 HRP UWB PHY를 함께 사용하는 dual-PHY 구조를 채택하여 네트워크 관리와 거리측정 기능을 분리하였다. 이를 NBA UWB라고 한다.

그림 3은 IEEE 802.15.4ab의 네트워크 구조를 나타낸 것이다. 협대역 PHY는 제어채널(control plane)의 역할을 수행하며, UWB PHY는 거리측정과 데이터 채널(data plane)로 동작한다. 즉, 협대역 PHY는 coordinator와 tag 간의 초기 접속(association), 시간 동기화(time synchronization), 세션 설정 및 제어 메시지 전달을 담당하며, HRP UWB PHY는 MMS 기반의 거리측정과 UWB 센싱을 수행한다. 이와 같은 기능 분리를 통해 UWB PHY는 거리측정과 센싱에 집중할 수 있으며, 협대역 PHY는 네트워크 관리 기능을 담당하여 전체 시스템의 확장성과 전력 효율을 향상시킬 수 있다.

IEEE 802.15.4ab 표준 이전에도 UWB의 전력소모를 줄이기 위해 BLE 등 별도의 무선기술을 사용하는 dual-PHY 방식이 있었다. 예를 들어 삼성이나 애플의 스마트폰은 거리 측정할 디바이스들이 먼저 BLE로 페어링한 후 UWB를 사용하여 거리를 측정한다[3,15]. 하지만 이 경우 두 통신방식의 주파수 차이가 크므로 별도의 안테나와

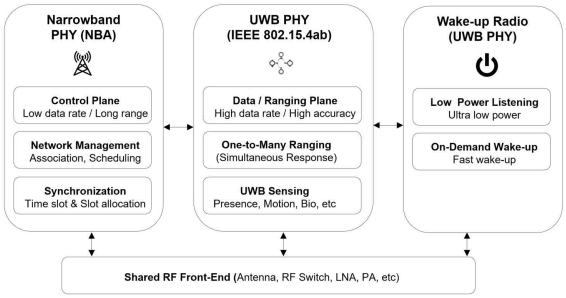


그림 3. IEEE 802.15.4ab UWB의 네트워크 구조
Fig. 3. Network architecture of IEEE 802.15.4ab UWB.

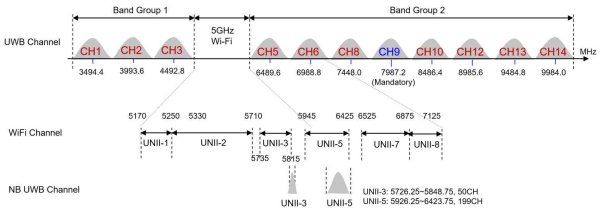


그림 4. UWB 채널과 Wi-Fi 채널
Fig. 4. UWB frequency channels and Wi-Fi channels.

무선모듈을 사용해야 하는 단점이 발생한다. 따라서 IEEE 802.15.4ab에서는 기존 BLE 기반 dual-PHY와 달리, 안테나와 일부 RF 회로의 공유 가능성을 높인 narrowband PHY를 새롭게 정의하여 하드웨어 복잡도를 줄이고 시스템 통합성을 향상시켰다.

IEEE 802.15.4ab에서는 NBA UWB를 지원하기 위하여 그림 4에서와 같이 약 5.8 GHz 및 6.2 GHz 대역에서 대역폭 2.5 MHz의 협대역 채널을 최대 250개까지 사용할 수 있도록 정의하고 있다. 이는 대규모 산업용 RTLS 환경에서는 여러 개의 UWB 네트워크가 동시에 운용될 수 있으므로 충분한 수의 협대역 제어 채널을 제공함으로써 네트워크 간 간섭을 줄이고 독립적인 네트워크 운용을 가능하게 한 것이다.

최근 IEEE 802.15.4ab 표준화가 마무리 단계에 접어들면서 차세대 UWB 칩셋 개발도 본격화되고 있다. 예를 들어 STMicroelectronics는 NBA를 포함한 IEEE 802.15.4ab를 지원하는 ST64UWB 제품군을 최초로 발표하였으며, Imec은 IEEE 802.15.4ab NBA 수신기를 세계 최초로 구현하여 최대 4배의 거리 향상을 실험적으로 검증하였다. 반면 현재 상용화된 NXP Trimension 및 Qorvo DW3000 계열은 IEEE 802.15.4z 기반 제품으로, 향후 IEEE 802.15.4ab를 지원하는 후속 제품이 출시될 것으로 예상된다. 이러한 차세대 IC는 전 세계적으로 활용 가능한 UWB 채널 9번과 함께 IEEE 802.15.4ab에서 정의한 협대역 채널을 지원하는 방향으로 구현되고 있다[16],[17].

두 번째로, IEEE 802.15.4ab 표준에서는 기존 IEEE 802.15.4z의 one-to-many ranging 기능을 확장하여 하나의 coordinator가 다수의 tag를 효율적으로 관리하고 거리측정을 빠르게 수행할 수 있도록 하고 있다. 기존 IEEE 802.15.4z에서도 one-to-many 방식이 가능하였으나, 주로

순차 응답 방식에 기반하므로 단말 수가 증가할수록 거리측정 시간이 증가하는 한계가 있었다. 반면 IEEE 802.15.4ab에서는 하나의 coordinator가 여러 tag의 거리측정 세션을 스케줄링하고, simultaneous response 기능을 이용하여 다수의 tag가 동일한 ranging sequence에 대해 동시에 응답할 수 있도록 지원한다. 이를 통해 순차적인 거리측정 방식에 비해 전체 거리측정 지연시간(latency)을 크게 감소시키고 네트워크 처리량(throughput)을 향상시켜 대규모 RTLS 환경에서도 높은 확장성을 제공한다. 이러한 기능은 스마트팩토리, 물류 자동화, 자율이동로봇(AMR/AGV) 등 다수의 이동체를 동시에 추적해야 하는 산업용 응용에 특히 유용하다. 그림 5는 IEEE 802.15.4ab에서 정의된 one-to-many MAC 동작 모드 중 basic one-to-many와 simultaneous one-to-many를 비교한 것이다. basic one-to-many는 기존 IEEE 802.15.4z와 유사한 순차 응답 방식을 사용하는 반면, simultaneous one-to-many는 여러 응답기가 동일한 ranging slot에서 동시에 응답하여 네트워크 지연시간을 감소시킨다. 이 밖에도 contention-based 및 time-efficient one-to-many 모드가 정의되어 있다[18]~[20].

마지막으로 IEEE 802.15.4ab에서는 저전력 운용을 위하여 WuR(wake-up radio) 기능을 새롭게 도입하였다. wake-up radio는 별도의 협대역 PHY를 이용하는 것이 아니라 전용 UWB 채널(dedicated UWB channel)을 이용하여 초저전력 수신 기능을 제공한다. 평상시에는 UWB 송수신기를 절전 상태로 유지하다가 WUB(wake-up burst)가 검출되면 해당 장치의 UWB PHY를 활성화하여 거리측정이나 데이터 통신을 수행한다. Wake-up 메시지는 약 500개의 UWB 펄스로 구성된 wake-up burst를 이용하며, 62.4 MHz의 PRF(pulse repetition frequency)에서 약 8 μs 동안 송신된다. 또한 BPM(burst position modulation)을 이용하여 start bit와 16-bit device ID를 전달함으로써 특정 장치만 선택적으로 활성화할 수 있다. Wake-up 수신기는 약 10.25～102.5 ms 주기로 매우 짧은 시간 동안만 wake-up burst를 탐지하므로 평균 소비전력을 크게 줄일 수 있으며, 수년 이상의 배터리 수명을 요구하는 저전력 산업용 RTLS 태그 및 IoT 센서에 적합하다[21].

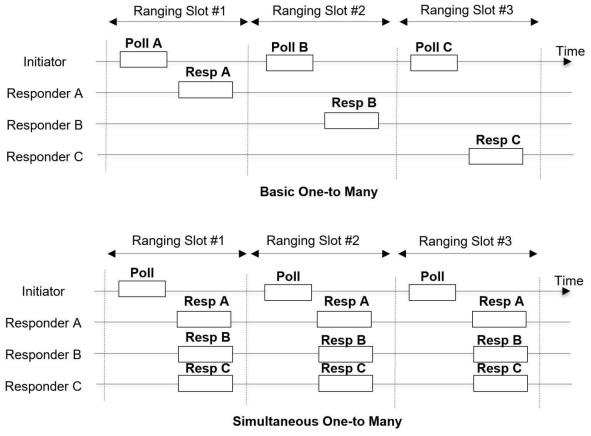


그림 5. IEEE 802.15.4ab UWB MAC 계층 기술
Fig. 5. UWB MAC layer technologies in IEEE 802.15.4ab.

이와 같이 IEEE 802.15.4ab는 dual-PHY 기반 네트워크 구조, NBA, 다양한 one-to-many ranging 모드 및 wake-up radio를 통해 기존 IEEE 802.15.4z보다 높은 네트워크 확장성과 저전력 운용 능력을 제공한다. 이러한 기능은 향후 스마트팩토리, 물류 자동화, 산업용 RTLS 및 대규모 IoT 환경에서 IEEE 802.15.4ab의 활용 범위를 크게 확대할 것으로 기대된다.

2-4 IEEE 802.15.4ab의 무선센싱 기술

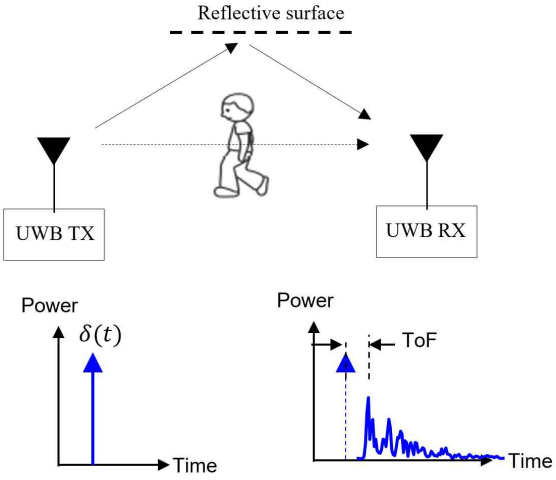
기존 IEEE 802.15.4z 기반 UWB 시스템에서도 CIR(channel impulse response) 정보를 이용한 사람 감지, 호흡 측정 및 동작 인식 등의 다양한 센싱 연구가 활발히 수행되어 왔다. 그러나 이러한 연구들은 대부분 거리측정을 위해 송수신된 패킷으로부터 부가적으로 CIR 정보를 추출하여 활용하는 방식으로, 센싱 기능이 표준화되어 있지 않아 장치 간 상호운용성과 성능 보장이 어려운 한계가 있었다[22],[23].

IEEE 802.15.4ab에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 UWB 센싱을 독립적인 서비스로 정의하고, 거리측정과는 별도의 센싱 절차 및 프레임 구조를 지원한다. 이를 통해 기존 위치측정 중심의 UWB 기술을 환경 인지(environment perception)가 가능한 무선센싱 플랫폼으로 확장하고 있다. 이는 현재 학계에서 활발히 연구되고 있는 ISAC(integrated sensing and communication) 개념을

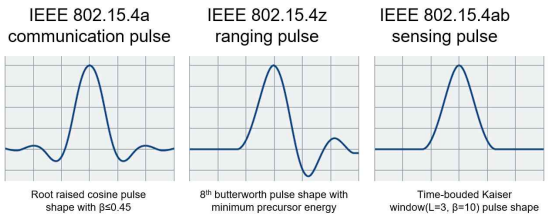
UWB 환경에 적용한 형태로 볼 수 있다.

그림 6(a)는 IEEE 802.15.4ab에서 정의하는 UWB 센싱의 기본 동작을 나타낸다. 센싱 송신기(anchor 또는 initiator)는 센싱 패킷을 송신하고, 수신기(anchor 또는 tag with Rx)는 대상체에서 반사되어 돌아오는 신호를 수신하여 CIR을 추정한다. 이 CIR의 특성으로부터 주변 환경에 의한 반사신호의 크기, 위상 및 도플러 변화를 분석하여 presence detection, motion detection, vital sign monitoring, activity recognition 및 environment sensing과 같은 다양한 센싱 정보를 추출할 수 있다.

IEEE 802.15.4ab에서는 센싱 성능 향상을 위하여 기존 통신 및 거리측정용 펄스와 다른 센싱 전용 펄스를 정의하고 있다. 그림 6(b)는 IEEE 802.15.4a 통신용 펄스, IEEE 802.15.4z 거리측정용 펄스 및 IEEE 802.15.4ab 센싱용 펄스를 비교한 것이다. IEEE 802.15.4a에서는 RRC(root raised cosine) 기반 펄스를 사용하여 통신 성능을 확보하였으며, IEEE 802.15.4z에서는 펄스의 앞부분인 전구간(precursor)에 최소 에너지를 갖는 butterworth 기반 펄스를 이용하여 거리측정 정확도를 향상시켰다. 반면 IEEE 802.15.4ab에서는 시간 경계(time-bounded)가 명확한 Kaiser window 기반 펄스(L=3, β=10)를 채택하여 전구간 및 후구간(Postcursor) 에너지를 최소화하였다. 이러한 펄스는 거리 사이드로브를 감소시키고 약한 반사신호를 보다 정확하게 검출할 수 있어 사람의 미세 움직임이나 생체신호와 같은 고해상도 센싱에 적합하다.



(a) UWB 센싱 동작원리
(a) Principle of UWB sensing



(b) 다양한 UWB 펄스 특성
(b) Characteristics of various UWB pulses

그림 6. UWB 무선센싱 기술
Fig. 6. UWB wireless sensing technology.

또한 IEEE 802.15.4ab에서는 센싱 범위와 거리 분해능을 동시에 향상시키기 위하여 주파수 스티칭(frequency stitching) 기법을 지원한다. 전체 센싱 대역을 여러 개의 서브밴드(sub-band)로 분할한 후 각 서브밴드에서 순차적으로 센싱 신호를 송수신하여 개별 CIR 또는 주파수 응답을 획득한다. 이후 각 서브밴드의 측정 결과를 주파수 영역에서 정렬(alignment)하고 결합함으로써 하나의 넓은 유효 대역폭을 갖는 합성 신호를 생성한다. 이러한 방식은 단일 대역폭으로는 구현하기 어려운 고해상도 거리 프로파일(range profile) 또는 CIR을 제공하며, 넓은 센싱 범위에서도 높은 거리 분해능을 유지할 수 있다.

주파수 스티칭을 통해 확보되는 유효 대역폭을 B_{eff}라 하면 이상적인 거리 분해능은 식 (3)과 같다.

$$\Delta R = \frac{c}{2B_{eff}} \tag{3}$$

여기서 c는 빛의 속도이며, B_{eff}는 스티칭된 전체 유효 대역폭이다. 즉, 여러 개의 서브밴드를 결합하여 B_{eff}를 증가시킬수록 더 높은 거리 분해능을 얻을 수 있다.

IEEE 802.15.4ab의 무선센싱은 기존 거리측정 기능을 그대로 유지하면서도 표준화된 센싱 패킷, 센싱 전용 펄스 및 주파수 스티칭을 통해 보다 높은 센싱 성능과 장치간 상호운용성을 제공한다. 이러한 기술은 스마트팩토리, 헬스케어, 서비스 로봇, 스마트홈 및 산업용 IoT 등 다양한 응용 분야에서 위치정보와 환경정보를 동시에 제공하는 차세대 UWB 플랫폼의 핵심 기술로 활용될 것으로 기대된다.

Ⅲ. UWB 국제 표준화 및 기술기준 동향

3-1 UWB 기술기준 동향

초기 UWB 기술은 초광대역 스펙트럼을 이용하여 기존 무선시스템과 주파수를 공유하는 underlay 무선기술로 제안되었으며, 기존 무선서비스에 유해한 간섭을 발생시키지 않는 범위에서 매우 낮은 전력으로 운용하는 것을 기본 원칙으로 하였다. 이에 따라 미국 FCC와 유럽 ETSI를 비롯한 주요 규제기관은 1 ms 시간 구간에서 평균 전력밀도(PSD, power spectral density)를 약 −41.3 dBm/MHz 수준으로 제한하고 피크전력밀도는 0 dBm/50 MHz로 제한하는 기술기준을 마련하였으며, 이러한 기준은 초기 UWB 통신과 위치측정 서비스를 지원하는 데 충분한 수준으로 인식되어 왔다[1],[24].

그러나 이러한 과거 기술기준은 산업용 RTLS, 스마트 팩토리, 로봇 및 차량 응용과 같이 보다 넓은 운용 범위와 높은 링크 버짓을 요구하는 차세대 UWB 기술을 충분히 지원하기는 어려운 상황이다.

다행히 일부 국가에서는 차세대 UWB 기술을 지원하기 위한 기술기준 개정을 추진하고 있다. 특히, 유럽 ETSI에서는 enhanced indoor device 개념을 도입하여 공장, 물류창고 및 산업시설과 같이 설치 위치가 고정되고 네트워크를 통해 관리되는 실내 인프라 장치를 대상으로 기존보다 완화된 운용 조건을 허용하고 있다. ETSI의 기술기준은 표 2와 같이 평균 전력밀도(average PSD)를 기존 −41.3 dBm/MHz에서 −31.3 dBm/MHz까지 상향하고, Peak PSD 역시 기존보다 10 dB 완화하여 최대 10 dBm/50 MHz까지 허용한다. 평균 출력 상향은 장시간 송신을 기반으로 하는 MMS 운용에 유리한 환경을 제공하며, peak 출력 상향은 개별 UWB 펄스의 송신 에너지를 증가시켜 수신 SNR과 링크 버짓 향상에 기여할 수 있다. 다만 이러한 출력 완화는 indoor 환경에서 indoor controller에 의해 관리되는 장치를 대상으로 적용되며, duty cycle 관리와 장치 식별 기능 등을 통해 높은 평균 출력에서도 안정적인 전파 환경을 유지할 수 있도록 규정하고 있다[10].

한편 미국 FCC 역시 UWB 응용 서비스의 확대에 맞추어 기술기준을 지속적으로 개선하고 있다. 최근에는 전기차 무선충전, 차량 자동 정렬 및 차량-인프라 간 정밀 위치측정과 같은 실외 UWB 응용(outdoor UWB applications)을 지원하기 위한 운용 조건을 허용함으로써 기존 실내 중심의 UWB 활용 범위를 실외 환경까지 확대하고 있다. 이는 UWB 기술이 스마트폰 기반 digital key나 실내 RTLS를 넘어 미래 모빌리티와 지능형 교통시스템(intelligent transportation system) 분야로 확장되고 있음을 보여주는 대표적인 사례라 할 수 있다[11],[25].

표 2. ETSI의 UWB 기술기준 비교
Table 2. Comparison of conventional and enhanced ETSI UWB local regulations.

Item	Conventional ETSI	Enhanced indoor device
Average PSD	−41.3 dBm/MHz	−31.3 dBm/MHz
Peak PSD	0 dBm/50MHz	10 dBm/50MHz
Network control	Not required	Indoor controller
Duty cycle	Not required	Controlled
Target applications	Indoor RTLS	Industrial RTLS/robotics

ETSI와 FCC의 최근 기술기준 변화는 접근 방식에는 차이가 있으나 공통적으로 차세대 UWB 응용 서비스를 지원하기 위한 방향으로 발전하고 있다는 점에서 의미가 있다. ETSI는 산업용 실내 인프라 환경에서 링크 버짓 향상을 지원하기 위하여 평균 출력과 네트워크 기반 운용 조건을 개선하였으며, FCC는 새로운 산업 응용을 수용하기 위하여 실외 환경에서의 UWB 활용 범위를 확대하였다. 이러한 변화는 초기 underlay 기반의 보수적인 규제에서 벗어나 차세대 UWB 기술과 산업 응용을 지원하는 방향으로 국제 기술기준이 점진적으로 발전하고 있음을 보여준다.

3-2 국내 기술기준 현황 및 고려사항

국내 UWB 기술기준은 초기 UWB 서비스 환경을 기반으로 제정된 이후 큰 틀에서 유지되고 있으며, 현재까지는 고정밀 실내 위치측정, 차량용 digital key 및 일반적인 근거리 UWB 서비스를 지원하는 데에는 충분한 역할을 수행하고 있다. 또한 기존 기술기준은 UWB와 다른 무선시스템 간의 전파 공존성을 고려하여 IEEE 802.15.4z 표

준을 고려한 MCC(mobile country code) 예외 규제를 적용하고, 그 외 UWB 기기는 항공기, 선박, 위성 및 모형비행기 등에 사용하지 못하도록 하여 안정적인 전파 이용 환경을 제공하고 있다. 현재 국내 UWB 기술기준은 표 3과 같다.

그러나 현재 국내 기술기준이 차세대 UWB 서비스를 충분히 고려하고 있는지에 대해서는 향후 검토가 필요하다. 예를 들어 장거리 산업용 RTLS나 고신뢰 위치측정 서비스를 지원하기 위한 국제 기술기준의 변화와 국내 산업 환경을 함께 고려한 기술적 검토가 필요할 것으로 판단된다. 또한 IEEE 802.15.4ab에서 새롭게 정의한 NBA는 협대역 제어채널을 이용하여 대규모 네트워크의 초기 접속과 시간 동기화를 수행하는 기술이다. 향후 이러한 기능이 국내에서도 활용될 경우에는 협대역 PHY의 운용 주파수, 기존 협대역 무선시스템과의 공존성 및 관련 주파수 이용 정책 등에 대한 검토가 이루어질 필요가 있다. 반면 wake-up radio와 frequency stitching은 현재 기술기준보다는 저전력 설계 및 신호처리 구현 기술과의 관련성이 높으므로, 향후 기술 발전에 따라 필요 시 추가적인 검토가 가능할 것으로 판단된다.

표 3. 국내 UWB 기술기준[1]
Table 3. Local regulations for UWB in Korea[1].

구분		local regulations
주파수 대역 (GHz)		4.2~4.8 6.0~10.2
전력밀도	평균전력	−41.3 dBm/MHz
	첨두전력	0 dBm/50 MHz
일반적 조건		항공기, 선박, 위성, 모형비행기에의 적용을 금지함
주파수대역폭		450 MHz 이상일 것 (1 MHz RBW, 10 dB 대역폭 기준)
불요발사		−90 dBm/MHz@1GHz 미만 −85 dBm/MHz@1~2.7 GHz −70 dBm/MHz@2.7~3.735 GHz −51.3 dBm/MHz@3.735~4.8 GHz −70 dBm/MHz@4.8~6 GHz −51.3 dBm/MHz@6~10.2 GHz −70 dBm/MHz@10.2 GHz이상
간섭대책	4.2~4.8 GHz	−61 dBm 이상 신호감지할 경우 2초 이내 −70 dBm/MHz이하로 저감
	6.0~7.2 GHz	Duty 규정적용 실외 기기 금지
부차적 전파발사		−54 dBm/MHz이하@사용주파수대역

- 7737 MHz~8236.8 MHz 대역의 UWB 방식을 지원하는 “이동통신용 무선설비의 이동국 송신장치”는 MCC(mobile country code) 등을 적용한 펌웨어에 대한 자체확인서, 10초 이내에 UWB 기기의 송신 중지기능을 증명하는 시험성적서, ‘신고하지 아니하고 개설할 수 있는 무선국용 무선설비의 기술기준’ 제10조제1항 제2호에 대한 “제조자 서약서”를 제출받아 확인한다.
- 해당기기 또는 사용자 설명서 등에 “항공기, 선박, 위성, 모형비행기에의 적용을 금지한다.”는 문구가 기재되어 있는지를 확인한다.

국내 UWB 기술기준의 개정 여부는 전파 이용 효율, 기존 무선서비스와의 공존성, 산업적 수요 및 국제 표준화 동향 등을 종합적으로 고려하여 결정되어야 한다. 특히 IEEE 802.15.4ab 기반 차세대 UWB 시스템의 상용화가 본격화될 경우, 국제 기술기준의 변화와 국내 산업 환경을 함께 고려한 객관적인 기술 검토가 이루어질 필요가 있으며, 관련 산·학·연 및 규제기관 간의 지속적인 논의가 중요할 것으로 판단된다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 IEEE 802.15.4ab 기반 차세대 UWB 기술의 주요 내용을 살펴보고, 최근 국제 UWB 기술기준의 변화와의 연관성을 분석하였다. 분석 결과 IEEE 802.15.4ab는 기존 IEEE 802.15.4z를 기반으로 MMS UWB, NBA UWB, UWB 센싱 등 다양한 기능을 새롭게 도입함으로써 기존의 근거리 위치측정 중심 UWB 시스템을 장거리 위치측정, 산업용 RTLS 및 무선센싱 플랫폼으로 확장하고 있으며, 이러한 변화는 기술기준과 밀접하게 연관됨을 확인하였다. 이에 따라 국내 기술기준에 대해서도 국제 동향과 국내 산업 환경을 고려한 기술적 검토가 필요함을 제시하였다. 물론 국내 UWB 기술기준은 현재까지 다양한 위치측정 서비스를 안정적으로 지원해 왔으며, 앞으로도 기존 무선시스템과의 공존성을 고려한 전파관리 원칙은 지속적으로 유지되어야 할 것이다. 하지만 IEEE

802.15.4ab 기반 차세대 UWB 기술의 상용화와 국제 기술기준의 발전이 지속됨에 따라, 국내에서도 산업용 UWB 서비스와 새로운 응용 환경을 고려한 기술적 검토가 이루어질 필요가 있다. 본 논문에서 정리한 IEEE 802.15.4ab 기술과 국제 기술기준의 최신 동향이 향후 국내 UWB 기술기준의 발전 방향을 논의하는 데 유용한 참고자료로 활용되기를 기대한다.

References

[1] B. J. Jang, "Principles and trends of UWB positioning technology," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 33, no. 1, pp. 1-11, Jan. 2022.

[2] M. F. R. Al-Okby, S. Junginger, T. Roddelkopf, and K. Thurow, "UWB-based real-time indoor positioning systems: A comprehensive review," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 23, p. 11005, Nov. 2024.

[3] D. Coppens, A. Shahid, S. Lemey, B. Van Herbruggen, C. Marshall, and E. De Poorter, "An overview of UWB standards and organizations (IEEE 802.15.4, FiRa, Apple): Interoperability aspects and future research directions," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 70219-70241, Jun. 2022.

[4] L. Ward, J. Köpp, *Exploring the Future of UWB: Comprehensive Insights into IEEE 802.15.4ab*, vol. 01.00, Munich, Rohde&Schwarz, 2025.

[5] *IEEE Standard of Low-Rate Wireless Networks—Amendment 1: Enhanced Ultra Wideband (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques*, IEEE Std 802.15.4z-2020, Aug. 2020.

[6] P. Sedlacek, M. Slanina, and P. Masek, "An overview of the IEEE 802.15.4z standard its comparison and to the existing UWB standards," in *2019 29th International Conference Radioelektronika(RADIOELEKTRONIKA)*, Pardubice, Apr. 2019.

[7] *IEEE Draft Standard for Low-Rate Wireless Network Amendment 1: Enhanced Ultra Wide-Band (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Medium Access and Control (MAC) sublayer Enhancements*, IEEE P802.15.4ab, Sep. 2021.

[8] *FiRa® Physical Layer (PHY) Technical Specification*, Version 2.0, Sep. 2021.

[9] *Car Connectivity Consortium Digital Key Release 3.0 Technical Specification*, Version 1.2.3, CCC-TS-101, Nov. 2023.

[10] *Ultra Wide Band (UWB) Transmission Systems; Harmonised Standard for Access to Radio Spectrum*, ETSI EN 302 065 Series, 2016.

[11] Federal Communications Commission (FCC), Radio Frequency Devices, *47 C.F.R. Part 15*. 2026.

[12] A. R. Kabbinale, A. Bansal, and K. S. Gopalan, "Towards next-generation ultra-wideband technology," in *2023 15th International Conference on COMmunication Systems & NETworkS(COMSNETS)*, Bangalore, Jan. 2023, pp. 830-834.

[13] S. Han, B. J. Jang, "Extending the coverage of IEEE 802.15.4z HRP UWB ranging," *Sensors,* vol. 25, p. 3058, May 2025.

[14] Y. S. Jang, S. Han, and B. J. Jang, "Optimization of ranging accuracy and measurement time duration for IEEE 802.15.4z UWB," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 36, no. 3, pp. 274-282. Mar. 2025.

[15] V. Di Pietra, P. Dabove, "Recent advances for UWB ranging from Android smartphone," in *2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium(PLANS)*, Monterey, CA, Apr. 2023, pp. 1226-1233.

[16] STMicroelectronics, ST64UWB, the first 802.15.4ab device with narrowband assistance for 8x more range and entirely new radar applications, Press Release, 2026. Available: https://blog.st.com/st64uwb/

[17] Imec, Ultra-wideband (UWB) technology: Use imec's high-precision and low-power wireless technology to design and manufacture your next-generation UWB chips., Press Release, 2026. Available: https://www.imec-int.com/en/5G-and-wireless-iot-communication/ultra-wide-band-uwb-technology

[18] P. Corbalán, G. P. Picco, "Concurrent ranging in Ultra-

wideband Radios: Experimental Evidence, Challenges, and Opportunities," in *EWSN '18: Proceedings of the 2018 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks*, Madrid, Feb. 2018.

[19] M. Pelka, H. Hellbrück, "S-TDoA – Sequential time difference of arrival – A scalable and synchronization free approach for positioning," in *2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Doha, Apr. 2016.

[20] B. Kwon, H. Yoo, S. Han, and B. J. Jang, "Implementation of high-speed indoor positioning system based on IEEE 802.15.4z UWB," in *Proceedings of the Work-in-Progress Papers at the 13th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation(IPIN-WIP 2023)*, Nuremberg, Sep. 2023.

[21] S. Cortesi, C. Vogt, and M. Magno, "WakeLoc: An ultra-low power, accurate and scalable on-demand RTLS using wake-up radios," in *IEEE INFOCOM 2025 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, London, May 2025.

[22] A. Moschevikin, E. Tsvetkov, A. Alekseev, and A. Sikora, "Investigations on passive channel impulse response of ultra wide band signals for monitoring and safety applications," in *Proceedings of the 2016 3rd International Symposium on Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems(IDAACS- SWS)*, Offenburg, Sep. 2016, pp. 97-104.

[23] G. Lee, S. An, B. J. Jang, and S. Lee, "Deep learning for counting people from UWB channel impulse response signals," *Sensors*, vol. 23, no. 16, p. 7093, Aug. 2023.

[24] R. J. Fontana, E. A. Richley, "Observations on low data rate, short pulse UWB systems," in *2007 IEEE International Conference on Ultra-Wideband*, Singapore, Sep. 2007, pp. 334-338.

[25] Federal Communications Commission (FCC), "Revision of part 15 of the commission's rules regarding ultra wideband transmission systems," FCC-02-48, Apr. 2002.

장 병 준 [국민대학교/교수]

https://orcid.org/0000-0002-5295-6050



1990년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)

1992년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)

1997년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)

1995년 3월～1999년 1월: LG전자(주)

1999년 1월~2003년 9월: 한국전자통신연구원 무선방송연구소

2003년 10월～2005년 8월: 정보통신연구진흥원

2013년 9월～2015년 8월: 미래창조과학부 민간전문가(CP)

2005년 9월～현재: 국민대학교 전자공학부 교수

[주 관심분야] 무선 통신 및 센싱 시스템, 레이다, 전파응용