

IEEE P802.11bp MAC 계층 표준 기술 동향

김진경, 명정호, 고영조
한국전자통신연구원

{jkkim, jhmyung, koyj}@etri.re.kr

Technology Trends in IEEE P802.11bp Medium Access Layer Standardization

Kim, Jin Kyeong; Myung Jung Ho; Ko, Young Jo
Electronics and Telecommunications Research Institute

요약

배터리 없이 주변 RF 에너지를 수집하여 통신하는 Ambient Power Communication(AMP) 기술의 IEEE 802.11bp MAC 계층 표준화 동향을 UL 채널 접근 메커니즘, 전력 관리, 프레임 포맷, 무선 전력 전송, 이중정적 후방산란 지원을 중심으로 분석한다.

I. 서론

IEEE 802.11bp 는 배터리 없이 주변 RF 에너지를 활용한 통신 기술 표준화를 목표로 2024 년 1 월 PAR 승인 후 진행되고 있다. MAC 계층은 극저전력 환경에서 효율적인 채널 접근과 최소 전력 소모라는 상충되는 요구사항을 만족시켜야 한다. 본고에서는 2025 년에 진행된 주요 기술 합의 내용을 중심으로 표준화 동향을 분석한다.

II. UL 채널 접근 방식

2.1 하이브리드 접근 방식 지원

UL 채널 접근 방식에 802.11bp 는 슬롯 기반 방식을 채택했다. 3 월 회의에서 랜덤 접근과 스케줄된 접근 두 가지 방식을 모두 지원하기로 합의했고, 9 월 회의에서 이를 결합한 2 단계 하이브리드 방식이 합의되었다. 첫 단계에서는 랜덤 접근으로 장치를 발견하고, 두 번째 단계에서는 성공한 STA 에게 스케줄된 타임슬롯을 할당한다.

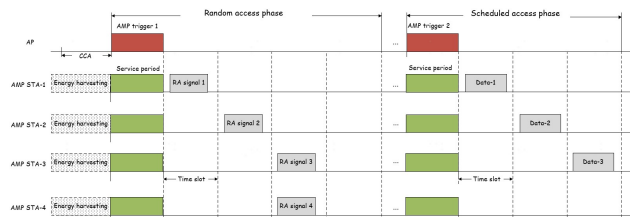


그림 1. 2 단계 하이브리드 접근 방식

3 월 회의를 통해 수용된 Number of Slots 로 할당된 슬롯 수를 표시하는 방안을 포함하여, 11 월 회의를 통해 AMP 트리거 프레임의 파라미터가 구체화되었다. 특히, 랜덤 접근 단계에서는 세션을 식별하는 Session ID 와 경쟁 윈도우 상한을 지정하는 ACWmax 가 주요 파라미터로 확정되었다. 경쟁 윈도우 관리에 있어 화웨이는 Persistent/Non-persistent ABOC 개념을 도입하고 Re-content bit 를 통해 STA 의 백오프 카운터 리셋을 제어하는 AP 제어 방식을, 오포는 RFID 의 Q 파라미터 방식을 차용하여 Session ID 로 그룹을 관리하는 방식을 제안했으나, 경쟁이 없다는 갑자기 대량 경쟁이 발생하는 예측 불가능한 트래픽 패턴에 대한 대응 수준이 주요 쟁점으로 남았다.

2.2 RFID 프로토콜 재사용

후방산란 통신의 효율성을 위해 3 월 회의에서 UHF RFID 표준의 논리적 인터페이스 일부를 재사용하기로 합

의했다. 또한 RFID 프로토콜 캡슐화의 법적 위험성과 인증 문제를 고려하여, 전체 프로토콜을 캡슐화하지 않고 논리적 인터페이스의 일부와 아이디어/원칙을 재사용하는 방향으로 의견을 정리하고 이후 11 월 회의에서 구현 방법이 논의되었다. 7 월 회의에서는 Select, Read, Write, Authenticate 명령어 지원이 합의되었다.

III. 전력 관리

극저전력 AMP 장치의 핵심 요구사항은 최소한의 전력 소모로 네트워크와 연결을 유지하는 것이다. 802.11bp 는 두 가지 상이한 전력 관리 패러다임을 동시에 지원한다.

3.1 두 가지 전력 관리 방식

802.11bp 는 듀티 사이클 동작과 AMP 서비스 주기의 두 전력 관리 방식을 지원한다. 듀티 사이클 방식은 짧은 주기의 인벤토리에 최적화되어 AP 가 주기적으로 트리거 프레임을 전송하면 STA 가 선택적으로 수신한다. 서비스 주기 방식은 긴 주기로 동작하는 센서를 위한 방식으로, STA 가 최소 각성 시간동안 프레임을 수신하지 못하면 수면 상태로 전환한다.

11 월 회의에서 발표된 두 전력 관리 방식의 전력 소모 비교를 통해, 듀티 사이클은 짧은 주기의 인벤토리에 적합하고 서비스 주기는 긴 주기의 센서 데이터 수집에 유리하나, 주로 전력 소모는 사용 시나리오에 크게 기인함이 확인되었다. 하지만 두 방식의 가정 차이로 인해 직접 비교는 어렵다는 의견도 제기되었다.

서비스 주기 운영의 핵심 과제는 긴 주기에서의 타이밍 동기화이다. 클럭 드리프트가 10^4 ppm 인 경우, 1 시간 경과 시 최악의 경우 36 초의 오차가 발생한다. 화웨이는 이를 해결하기 위해 STA 는 예상 SP 시작 시간보다 일찍 깨어나고, 비콘을 수신하여 클럭을 보정한 후, 정확한 타이밍으로 SP 를 시작하는 AMP 비콘 개념을 제안하였고, 9 월 회의에서 Partial Timestamp 를 방송 프레임에 포함하는 메커니즘이 합의되었다.

3.2 서비스 주기 광고 프레임

11 월 회의에서 AMP SP 광고 프레임이 도입되었다. 이 프레임은 SP ID, SP Start Time, SP Interval, SP Minimum Wake Duration 을 포함하며, UL 접근 정보를 선택적으로 포함할 수 있어 Service Period 관리와 UL 유도를 동시에 수행한다. UL 접근 정보가 포함되면 SP ID 가 서브그룹 수로 재해석되는 방식이 도입되었다.

IV. 프레임 구조

9 월 회의에서 AMP 프레임 구조가 MAC Header, Frame Body, FCS 로 확정되었다. MAC Header 는 Frame Control(8 비트), ID(12-16 비트), 프레임 타입에 따른 제어 정보를 포함하는 Type Dependent Control(8-16 비트)로 구성된다. Frame Body 의 가변 길이는 Active TX 와 후방산란의 경우 MAC header 에 표시하며, CRC 는 IEEE 802.11ba 의 16 비트 엔진을 재사용한다.

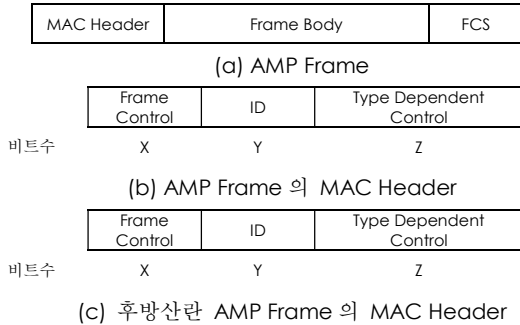


그림 2. AMP 프레임 구조

11 월 회의의 합의를 통해, Frame Control 은 8 비트, Type 필드는 3~4 비트를 사용한다. ID 필드는 AMP-enabled non-AP STA 의 경우 12 비트, Active TX non-AP AMP STA 의 경우 12 또는 16 비트, Backscatter non-AP AMP STA 의 경우 16 비트이다. Type Dependent Control 은 AMP-enabled non-AP STA 의 경우 12 비트, Active TX non-AP AMP STA 의 경우 존재 시 8, 12 또는 16 비트, Backscatter non-AP AMP STA 의 경우 존재 시 TBD 이다.

주요 프레임 타입으로는 AMP 트리거 프레임이 랜덤 및 스케줄된 접근 파라미터를 포함하고, AMP Ack 프레임이 UL 프레임을 확인응답하며, AMP Wake-Up 프레임이 AMP-enabled STA 를 깨운다. 11 월 회의에서 Multi-STA ACK 개념을 도입하고 비트맵을 사용하는 등의 다중 STA ACK 가 논의되었으나 STA 가 대기 시간 동안 깨어있어야 하거나 타이밍 드리프트와의 충돌 처리가 쟁점으로 남았다.

V. 무선 전력 전송

5.1 에너지이저 제어

3 월 회의에서 AP 가 에너지이저에 제어 정보를 전송하는 메커니즘이 정의되었고, 11 월 회의에서 시작 시간, 지속 시간, 시간 간격, 송출 전력, 주파수 관련 파라미터가 구체화되었다. 에너지이저는 S1G WPT 전송 지원 여부, 2.4GHz 여기(excitation) 파형 전송 지원 여부, 최대 송신 전력을 AP 에 보고한다.

11 월 회의에서 에너지이저 아키텍처에 대한 논의가 진행되었다. 하일라는 에너지이저와 여기자를 분리하여 독립적 개체로 정의하는 방안을 제안했으나, 규격 복잡도 증가 우려로 반대 의견이 있었다. Non-AP AMP STA 는 RF 신호 에너지 수확 지원 여부를 1 비트로 표시하며, 운영 상태 기반 또는 단순화된 에너지 레벨 보고 방식이 제안되었다.

5.2 WPT 공존 및 파형

11 월 회의에서 "에너지이저는 RFID 전용 대역을 제외한 S1G 대역에서 WPT 신호를 전송하기전에 LBT (Listen Before Talk) 를 수행해야 한다"로 LBT 요구 사항이 합의되었다. WPT 는 통신과 동일한 채널화를 사용하며, 각 규제 도메인별로 채널 부분집합의 사용을 권장한다.

파형으로는 단일 반송파가 권장되며, 주파수 도약은 미국에서 필수, 중국은 예외, 유럽은 TBD 이다. 주요 쟁점으로는 11ah 공존을 위한 프리앰블의 필요성, 규제

준수를 위한 주파수 도약, 채널 대역폭 통일이 논의되었다.

VI. 이중정적 후방산란 지원

7 월 회의에서 2.4GHz 대역 40MHz 채널에서 주파수 이동을 사용하는 이중정적 후방산란 모드가 정의되었다. 11 월 회의에서 중심 주파수가 DL 여기 주파수로부터 고정 절대값만큼 이동하는 방식이 합의되었고, $\pm 10\text{MHz}$ 이동을 사용하는 SSB 구조가 제안되었다.

DL PPDU 는 802.11bp 프리앰블, AMP SYNC, AMP Data, Excitation 으로 구성되며, Active Tx 와 동일한 설계를 사용한다. 40MHz 채널 운영을 위해 미디어텍은 MU-RTS 기반 보호를, 하일라는 CTS-to-self 방식을 제안했다. 주파수 이동 방향 지시와 UL 채널 정보 포함 방안이 논의되었으나 세부 사항은 미결로 남았다.

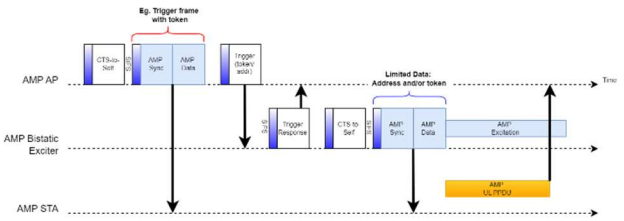


그림 3. 이중정적 후방산란 무선 전력 전송 예시

VII. 결론

IEEE 802.11bp MAC 계층 표준화는 2 단계 하이브리드 채널 접근, 두 가지 전력 관리 패러다임 동시 지원, 서비스 주기 광고 프레임을 통한 통합 관리 등의 합의를 이루었다. TGBp는 2025년 9월 D0.1 작업 개시가 승인되어 작성이 되었으며, 이후 11 월 D0.2 업데이트를 위한 PD T 를 승인하였고, 올해에도 후속 작업을 계속 이어갈 것으로 예상된다.

경쟁 윈도우의 적응형 메커니즘, 전력 관리 패러다임 상호작용, 에너지이저 아키텍처 정의, 이중정적 후방 산란 채널 보호 방식 등 중요한 쟁점이 남아있으며, 이를 포함하여 향후 실제 배치 시나리오 성능 검증과 기존 IEEE 802.11 시스템과의 공존 방식 구체화가 표준 완성의 핵심이 될 것이다.

IEEE 802.11bp 표준 완성 시 물류 추적, 재고 관리, 환경 센싱, 스마트 농업 등 배터리 교체가 비실용적인 IoT 응용 분야에서 지속 가능한 무선 통신 인프라 기반이 될 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2026년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (NO.RS-2024-00397216, Upper-mid Band Extreme massive MIMO (E-MIMO) 시스템 기술 개발)

참 고 문 헌

- [1] IEEE P802.11 TGBp, Specification Framework for TGBp, IEEE 802.11-24/1613r165, 2025.
- [2] IEEE P802.11 TGBp, IEEE 802.11 TGBp Motion Deck, IEEE 802.11-24/1322r10, 2025.
- [3] OPPO, UL access mechanisms for Active Tx AMP STAs, IEEE 802.11-25/0815r0, 2025.
- [4] HaiLa, Energizers and Bistatic Backscatter, IEEE 802.11-25/1932r1, 2025.
- [5] Huawei, AMP Channel Access - non-AP AMP STA behavior, IEEE 802.11-25/2035r0, 2025.