

채널 관점에서 무선전력전송의 인밴드 통신 해석

In-Band Communication Analysis of Wireless Power Transfer from a Channel Perspective

장 원 호 · 장 병 준*

Won Ho Jang · Byung-Jun Jang*

요 약

본 논문에서는 무선전력전송(WPT) 시스템의 순방향 및 역방향 인밴드 통신을 무선채널 관점에서 해석한다. 기존 무선통신의 채널과 달리 WPT 무선채널을 메모리효과를 가진 초협대역 주파수 선택적 무선채널로 모델링하였고, 동작 주파수, 결합 계수 및 부하 조건에 따른 순방향 링크의 통신성능 및 역방향 링크의 BER 성능을 분석하였다. 본 논문에서 제안하는 WPT 채널 분석 모델은 무선전력전송과 인밴드통신을 상호 연결하는 통합적인 관점을 제공하며, 최적의 무선전력전송 시스템 설계를 위한 새로운 통찰력을 제시한다. 이론 결과를 검증하기 위하여 시뮬레이션을 통해 이론의 타당성을 확인하였고, 실제 Qi 표준과 비교한 결과 본 연구에서 제안한 해석이 타당함을 확인할 수 있었다.

Abstract

This paper analyzes the forward and reverse in-band communication of a wireless power transfer (WPT) system from the perspective of a wireless channel. Unlike conventional wireless communication channels, the WPT wireless channel was modeled as an ultra-narrowband frequency-selective wireless channel with a memory effect. The communication performance of the forward link and the bit error rate performance of the reverse link were analyzed according to the operating frequency, coupling coefficient, and load conditions. The proposed WPT channel analysis model provides an integrated perspective that interconnects WPT and in-band communication, offering new insights for the design of an optimal WPT system. To verify these results, the theory was validated through simulation. A comparison with the actual Qi standard confirmed the validity of the analysis proposed in this study.

Key words: Wireless Power Transfer, Channel, Load Modulation, FSK, BER

I. 서 론

무선전력전송(WPT, wireless power transfer) 기술은 가전제품부터 전기 자동차, 산업 자동화에 이르기까지 다양

한 응용 분야의 핵심 기술로 사용되고 있다. 초기에는 전동칫솔 등 자기유도 중심의 소출력 가전기기에서 시작되었던 WPT 기술은 2007년 자기공명을 이용한 공진형 무선전력전송의 개념이 도입된 이후 학계와 연구계를 중심

†이 연구는 2026년도 과학기술정보통신부의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원으로 연구되었음(No. RS-2026-25523162).」

(주)수니(SUNI Corporation)

*국민대학교 전자공학부(Department of Electrical Engineering, Kookmin University)

· Manuscript received May 3, 2026 ; Revised May 20, 2026 ; Accepted June 4, 2026. (ID No. 20260503-044)

· Corresponding Author: Byung-Jun Jang (e-mail: bjjang@kookmin.ac.kr)

으로 활발히 연구되어 왔다^[1]. 이후 Qi 표준의 스마트폰 무선충전이 대중화되고, kW 수준의 전기 자동차 무선충전과 같은 새로운 응용 분야가 생기면서 다양한 분야에서 WPT를 적용하려는 시도가 활발히 진행되고 있다^[2]. 최근에는 RF 대역을 이용한 무선전력전송(RF WPT) 연구도 활발히 진행되고 있으며 일부 저전력 응용에서 상용화가 이루어지고 있다^{[3][4]}.

이와 같이 다양한 WPT 기술이 연구되고 있지만 여전히 상용화 관점에서 가장 활발한 분야는 1 MHz 이하의 주파수를 사용하는 Qi 표준기반의 자기유도형 WPT 기술이다^[5]. 최근 Qi 표준에서는 자유도(free-positioning)보다는 자석을 이용한 자기정렬(Apple의 MagSafe) 기반 구조를 채택하여 송수신기 간 결합도를 안정적으로 확보하고, 이를 통해 고정된 공진 주파수(360 kHz)에서 안정적인 고출력 전력전송을 유지하는 방향으로 발전하고 있다. 대표적으로 2023년 발표된 Qi 2.0 표준에서는 15 W 이상 충전할 수 있도록 자석 기반 정렬을 이용한 MPP(magnetic power profile) 기술이 사용되고 있으며 최근 Qi 2.3 표준에서는 25W까지 지원하고 있다^{[6][7]}. 이는 미약한 자유도를 갖는 느린 충전보다 고속 충전을 선호하는 대중의 요구를 반영한 결과로 해석할 수 있다.

자기유도 WPT 연구동향을 살펴보면 전력전자 기반의 송수신기 회로 연구와 공진기 코일의 전자기 해석을 중심으로 다양한 결합조건 및 부하 상태에서 전력전송 효율을 극대화하는 데 초점이 맞추어져 있으며, 상대적으로 무선통신 관점의 연구는 부족하다^{[2][5]}. 그 이유는 그림 1(a)의 초기 Qi 1.0 표준에서는 역방향 통신 표준만 있었을 뿐만 아니라 출력이 낮고 부하가 걸린 상태에서 Q (loaded Q)값이 작아 역방향 통신인 부하변조(load modulation)의 BER(bit error rate) 성능이 크게 문제가 되지 않았기 때문이다. 하지만 최신 자기유도형 WPT 시스템은 자석을 이용한 자기정렬을 통해 높은 결합계수와 Q값을 갖는 15 W 이상의 고출력을 사용하면서 인밴드 통신 성능이 점점 중요해지고 있다. 그 이유는 송신기의 고출력 스위칭 컨버터에 의해 생성되는 고조파 및 스위칭 리플 성분은 인밴드 통신 대역에 간섭을 유발하고, 높은 결합계수로 인한 메모리효과를 가진 협대역 공진 채널 특성은 인밴드 통신 성능에 영향을 미칠 수밖에 없기 때문이다^[8]. 또한, 송신

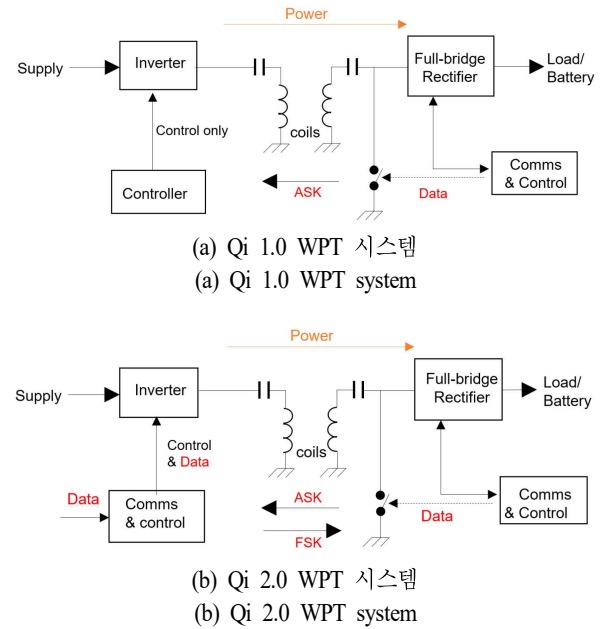


그림 1. Qi 1.0 WPT 시스템과 Qi 2.0 WPT 시스템의 구성 비교

Fig. 1. Comparison between Qi 1.0 WPT and Qi 2.0 WPT system configuration.

기와 수신기 간의 인밴드(in-band) 무선통신이 그림 1(b)와 같이 순방향과 역방향 모두에서 사용되고 있는데 상대적으로 낮은 데이터율을 갖는 순방향 통신속도를 개선할 필요가 있게 되었다^{[6][7]}. 유도형 WPT의 인밴드 통신 성능을 개선하려면 WPT 시스템에서의 인밴드 통신은 단순한 부가 기능이 아니라, 무선전력전송 상태와 강하게 결합된 무선채널 관점에서 이해될 필요가 있다.

따라서 무선전력전송과 인밴드 양방향 무선통신을 동시에 설명하는 통합 무선채널로서 WPT를 모델링하려는 연구는 매우 드물다. 이에 본 연구에서는 WPT에 대한 무선채널 관점의 새로운 해석을 제시함으로써 이러한 연구 공백을 메우는 것을 목표로 한다. 이를 위해 본 논문에서는 WPT 시스템을 단순한 전력 전달 회로가 아닌, 수신기 부하에 의해 정의되는 근접장 공진 채널로 해석한다. 이러한 해석은 WPT 시스템에서 무선전력전송과 통신을 분리하여 설계하는 기존 접근의 한계를 극복할 수 있는 새로운 해석 틀을 제공한다. 본 논문의 주요 기여는 다음과 같다.

- 1) WPT의 무선채널은 결합계수, 공진특성, 및 부하에 따라 변하는 초협대역 공진 채널로 모델링된다.
- 2) 순방향 FSK 통신 링크는 전력효율과 정보전달의 트레이드오프 관계가 있음을 확인한다.
- 3) 역방향 통신 링크는 부하 변조로 인한 전류 섭동을 통해 모델링되어 BER 관점에서 해석된다.

II. WPT 무선채널 모델링 및 특성

2-1 WPT 무선채널 모델링

유도형 WPT 시스템은 송신기와 수신기의 공진회로가 자기적으로 결합된 2-coil 구조로 모델링할 수 있다. 일반적인 2-coil 시스템은 그림 2와 같이 표현되며, 소스임피던스가 0 옴가 가정된 경우 각 회로는 식 (1) 및 식 (2)의 임피던스로 표현된다^{[9],[10]}.

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \quad (1)$$

$$Z_2 = R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + Z_L \quad (2)$$

여기서 Z_L 은 수신기의 부하 임피던스를 의미하며, R_1 과 R_2 는 각각 송신코일과 수신코일의 손실저항을 나타낸다. 두 코일 간의 결합은 상호 인덕턴스 M 으로 표현되며 결합계수를 k 라 정의할 때 식 (3)으로 정의된다.

$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \quad (3)$$

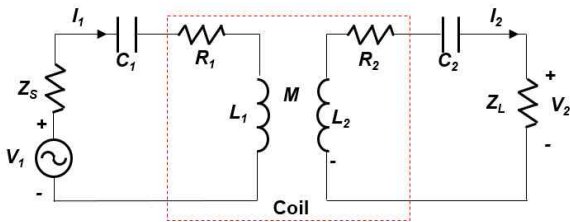


그림 2. 2-coil 구조를 갖는 유도형 무선전력전송 등가회로 모델

Fig. 2. Equivalent circuit model for 2-coil inductive wireless power transfer.

이 시스템은 식 (4)와 같은 전압-전류 관계로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & j\omega M \\ j\omega M & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

이제 수신기 전압 V_2 는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} V_2 &= Z_L I_2 \\ &= \frac{-j\omega M Z_L}{Z_1 Z_2 + \omega^2 M^2} V_1 \end{aligned} \quad (5)$$

따라서 송신기 입력 AC 전압 V_1 과 수신기 출력 AC 전압 V_2 의 비로 표현되는 순방향 전압전달함수 $H_{ac}(\omega, Z_L)$ 는 식 (6)과 같이 주어진다.

$$H_{ac}(\omega, Z_L) = \frac{V_2}{V_1} = \frac{-j\omega M Z_L}{Z_1 Z_2 + \omega^2 M^2} \quad (6)$$

식 (6)에서 정의된 순방향 전달함수 $H_{ac}(\omega, Z_L)$ 는 주파수에 강하게 의존하며, 공진 조건에서 최대값을 갖는다. 이는 WPT 시스템이 일반적인 평탄한 채널(flat channel)이 아닌, 특정 주파수에서 이득이 집중되는 강한 주파수 선택성(frequency selectivity)을 가지는 협대역 공진 채널(narrowband resonant channel)임을 의미한다. 특히 공진 주파수 ω_0 근처에서 전달함수의 크기는 급격히 변화하며, 이는 전력전송 효율뿐만 아니라 채널 민감도에도 직접적인 영향을 미친다. 또한, $H_{ac}(\omega, Z_L)$ 는 부하 임피던스에 직접적으로 의존한다. 부하 임피던스는 충전상태에 따라 변하므로 충전상태에 따라 다른 전압전달함수를 갖게 된다. 이는 기존 무선통신 채널이 송신기와 수신기 사이의 전파 환경에 의해 결정되는 것과 달리, WPT 채널은 수신기의 상태에 의해 채널 자체가 변하는 상호 결합 특성을 가짐을 의미한다.

2-2 순방향 통신링크 특성

2-1절의 WPT 채널 모델을 이용하여 먼저 순방향 인밴드 통신을 살펴보자. Qi 표준에서는 순방향 인밴드 통신으로 FSK(frequency shift keying) 변조를 사용한다^[11]. 이때 송신기는 스위칭 주파수를 식 (7)과 같이 변화시킨다.

$$f \in \{f_0 - \Delta f, f_0 + \Delta f\} \quad (7)$$

여기서 f_0 는 공진주파수를, Δf 는 주파수 편이 (frequency deviation)를 의미한다. WPT 수신기에서 FSK 신호를 복조하는 방법은 두 주파수 상태 간의 출력 진폭 차이 ΔA 를 이용하여 신호를 검출하는 것이 일반적이다. ΔA 는 식 (8)과 같이 정의된다.

$$\Delta A = |A(f_0 + \Delta f) - A(f_0 - \Delta f)| \quad (8)$$

단, 일반적인 무선통신의 FSK와는 달리 WPT 시스템에서는 전력전송효율을 유지하기 위해 주파수 편이 Δf 가 식 (9)와 같이 공진대역폭 내부로 제한된다.

$$\Delta f \ll \frac{f_0}{Q} \quad (9)$$

따라서 두 주파수 상태는 모두 공진점 근처에서 동작하게 되며, 수신 신호의 진폭 차이는 상대적으로 작게 나타난다. 결과적으로 순방향 통신은 잡음에 의해 성능이 제한되는 것이 아니라, 두 상태 간의 미세한 차이를 구분해야 하는 검출 한계(detection-limited) 환경에서 동작하게 된다.

또한, WPT 채널은 인덕터와 커패시터와 같은 에너지 저장소자를 포함하고 있기 때문에 본질적으로 메모리를 가지며, 이는 기존 무선통신 채널의 memoryless 채널 가정과 구별되는 중요한 특성이다. 특히 송신 주파수가 변화할 경우, 시스템은 즉시 새로운 정상상태에 도달하지 않고 일정 시간 동안 과도응답(transient response)을 거치게 된다. 이때 공진 회로의 대표적인 응답 시간은 식 (10)과 같이 근사적으로 표현될 수 있다.

$$\tau \approx \frac{Q}{\omega_0} \quad (10)$$

이 시간은 주파수 변화 이후 새로운 정상상태에 도달하기까지 필요한 시간을 의미하며, 일반적으로 안정적인 검출을 위해 심볼시간 T_s 는 식 (11)의 조건을 만족해야 한다.

$$T_s \gg N_f \tau \quad (11)$$

여기서 N_f 는 몇 개의 시상수를 기다릴 것인가를 정하는 safety factor를 의미한다. 이제 순방향 통신링크의 최대 심볼률은 식 (12)와 같다.

$$R_s \approx \frac{1}{T_s} \quad (12)$$

보통 이진 FSK에서는 최대심볼률이 최대비트율과 동일하다.

결론적으로, 공진기의 Q-factor가 증가할수록 settling time이 길어지며, 이는 순방향 통신에서의 최대 데이터 전송 속도를 제한하는 주요 요인이 된다. 이상을 요약하면 공진형 WPT 시스템에서 순방향 FSK 통신은 다음 세 가지 요소 간의 근본적인 절충 관계에 의해 결정된다.

- 1) 전력전송 효율: 공진점 근처에서 동작해야 하므로 Δf 가 작아야 한다.
- 2) 검출 용이성: FSK에서 두 상태 간의 차이를 크게 하기 위해서는 Δf 가 커야 한다.
- 3) 데이터 전송 속도: Q-factor가 클수록 settling time이 증가하여 데이터 속도가 제한된다.

2.3 역방향 통신링크 특성

본 절에서는 2-1절의 WPT 채널 모델을 이용하여 역방향 인밴드 통신을 분석한다. Qi 2.0 표준에서는 역방향 인밴드 통신방식으로 부하변조(load modulation)을 사용한다 [12]-[14]. 무선전력전송이 이루어지기 직전의 수신기 부하를 Z_{L0} 라고 하고, 인밴드 통신을 위해 $\pm \Delta Z$ 만큼 미세하게 변조되는 경우 부하는 식 (13)의 범위를 갖는다. 따라서 채널 자체가 바뀌게 된다.

$$Z_L \in \{Z_{L0} - \Delta Z, Z_{L0} + \Delta Z\} \quad (13)$$

이때 송신기 입력 전류는 식 (14)와 같으므로 Z_L 의 변화만큼 흔들리게 된다.

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_1 + \frac{\omega^2 M^2}{Z_2}} \quad (14)$$

이러한 부하의 미세한 변화에 따른 입력전류의 변화는 식 (15)와 같다.

$$\Delta I_1 \approx \frac{\partial I_1}{\partial Z_L} \Delta Z \quad (15)$$

이제 이 미세한 입력전류의 변화를 측정하여 수신기의

정보를 복조하게 된다. 따라서 WPT 역방향 링크의 전달 함수 H_{lm} 는 식 (16)과 같이 모델링된다.

$$H_{lm} = \frac{\partial I_1}{\partial Z_L} \quad (16)$$

이러한 관계는 WPT 채널에서는 부하변조가 송신기로 반사되어 입력전류의 미세한 변조 형태로 나타남을 의미하며, 이는 역산란 변조(backscatter modulation)와 동일한 물리적 메커니즘으로 해석될 수 있다. 식 (16)의 값이 클수록 복조 성능이 개선되어 BER이 낮아지게 된다.

결론적으로 공진조건에서는 순방향 전달함수 H_{ac} 뿐만 아니라 역방향 전달함수 H_{lm} 이 최대가 된다. 따라서 공진 주파수 선택은 단순히 전력전송 효율뿐 아니라 순방향 및 역방향 통신 성능에도 중요한 영향을 미침을 확인할 수 있다. 이러한 이론적 분석을 바탕으로 다음과 같은 역방향 통신링크의 특성을 도출할 수 있다.

- 1) 공진주파수에서는 역방향 BER 특성이 가장 좋다.
- 2) 스위칭 잡음과 같은 송신기의 잡음에 따라 역방향 BER이 결정된다.
- 3) 결합계수 k 가 감소하면 BER 성능이 나빠진다.
- 4) 부하조건에 따라 BER이 크게 변한다. 부하 임피던스가 큰 경우 식 (14)에 의해 BER 성능이 나빠진다.

III. 인밴드 통신 시뮬레이션

본 장에서는 II장에서 제시한 WPT 채널 모델의 타당성을 검증하기 위해 MATLAB 기반으로 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 파라미터는 표 1과 같다. 표 2는 상용 WPT 모듈의 일반적인 동작 범위를 반영하여 값이 설정되었으며, 특정 제품의 내부 회로를 정확히 복제하기보다는 공진, 결합 및 부하 반사 특성과 같은 지배적인 물리 현상을 반영하기 위한 대표 등가 모델로 구성되었다 [10],[15]. 특히, 공진 주파수는 Qi 표준에서 대표적으로 사용하는 120 kHz 및 360 kHz에서 공진되도록 설정하여 실제 유도형 무선충전 시스템과 유사한 조건을 반영하였으며, 결합계수는 일반적인 코일 간 정렬 상태를 고려하여 k 는 0.2로 설정하였다. 보통 WPT의 결합계수는 표 2와 같이 주어진다. 먼저 공진결합 WPT를 표방하는 AirFuel 표준

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation parameter.

Parameter	Symbol	Value	Unit
Input voltage	V_1	24	V
Operating frequency	f_0	120, 360	kHz
Primary inductance	L_1	20	uH
Secondary inductance	L_2	20	
TX capacitance	C_1	100/11	nF
RX capacitance	C_2	100/11	
Primary coil loss	R_1	0.15	Ω
Secondary coil loss	R_2	0.15	
Coupling coefficients	k	0.2	-
Average load	$Z_{L,0}$	100	Ω
Load modulation	ΔZ	5	Ω
Number of bits	N	10^5	-
Noise value (std)	σ_n	5×10^{-3}	-

표 2. 일반적인 WPT의 결합계수
Table 2. Typical coupling coefficients of WPT.

Standard	k value
Loose coupling (AirFuel)	0.05~0.15
General WPT (Qi 1.0)	0.1~0.3
MagSafe WPT (Qi 2.0)	0.2~0.4

의 경우 자유도가 높은 대신 결합계수가 낮다. AirFuel 표준에서는 결합계수가 낮은 대신 공진특성인 Q값을 높이는 방식을 사용한다. 다음으로 Qi 1.0 표준의 경우 결합계수가 0.1에서 0.3의 값을 갖는다. 마지막으로 Apple의 MagSafe를 채용한 Qi 2.0 MPP(magnetic power profile) 표준의 경우 자석으로 강제 정렬시키므로 상대적으로 결합계수가 크다. 이를 통해 주파수는 360 kHz로 고정되어 Qi 1.0보다 더 강한 공진특성을 갖게 된다.

표 2의 부하 임피던스는 배터리 충전 상태를 반영하기 위해 다양한 값으로 변화시키며 분석하였다. 일반적으로 배터리 잔량이 적은 초기 충전상태는 부하임피던스가 낮으며 완충상태로 가면 부하임피던스가 높아진다. 또한 잡음은 스위칭 컨버터, EMI 및 측정 오차를 포함하는 등가

잡음으로 모델링하였다.

3-1 순방향 인밴드 통신 시뮬레이션 결과

먼저 표 1 및 표 2의 파라미터를 이용하여 식 (6)에 의해 계산된 순방향 채널특성 $H_{ac}(f)$ 의 진폭스펙트럼은 그림 3과 같다. 그림은 120 kHz 공진하는 경우를 그린 것으로 360 kHz 공진 결과도 유사하여 생략하였다. 그림에서 알 수 있듯이 일반적인 무선통신이나 레이다 채널과는 달리 WPT의 채널은 초협대역 주파수 선택적 채널임을 알 수 있다. 따라서 그림 1(b)의 Qi 2.0 WPT에서 순방향 FSK 변조는 공진 대역폭 내로 제한된 주파수 편차를 가져야 하므로 검출 여유와 무선전력전송 효율 사이에서 상충(trade-off) 관계가 발생한다.

다음으로 그림 4는 120 kHz에서 공진하는 순방향 채널의 FSK의 주파수 천이에 따른 태그 수신기의 수신감도와 전력 효율을 시뮬레이션한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 Δf 가 증가할수록 ΔA 는 증가하여 수신기의 검출 성능은 좋아지지만, 동시에 공진점에서 벗어나면서 전력전송 효율이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 WPT 시스템에서 순방향 통신 성능이 단순한 잡음 환경이 아닌, 채널의 공진 특성 자체에 의해 제한된다.

결론적으로 작은 Δf 를 가지면 FSK 변조가 공진점 근처에서 동작하므로 전력전송 효율이 유지되지만, 두 상태

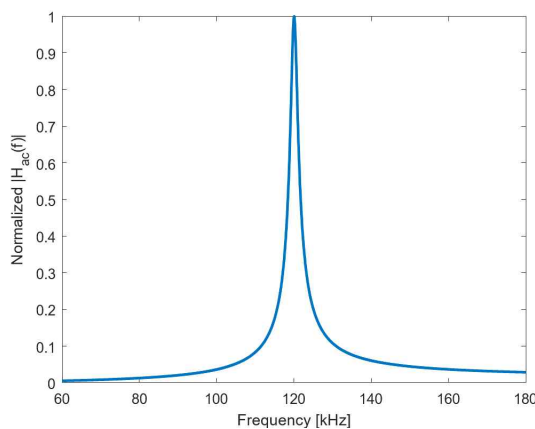


그림 3. 무선전력전송 순방향 채널의 주파수 응답 특성
Fig. 3. Frequency response characteristic of wireless power transfer forward channel.

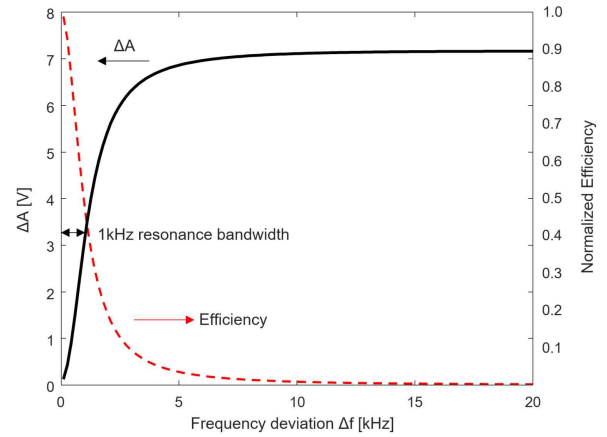


그림 4. 순방향 채널의 주파수 천이에 따른 수신감도 및 전력전송 효율

Fig. 4. Receiver sensitivity and WPT efficiency w.r.t. frequency deviation in forward channel.

간 진폭 차이가 적어 검출이 어렵다. 반면 큰 Δf 를 갖게 하면 진폭 차이는 증가하여 FSK 복조 성능은 개선될 수 있지만 공진점에서 벗어나면서 전력전송 효율이 급격히 감소하게 된다. 두 효과를 동시에 고려하기 위해 검출 성능과 전력전송 효율 간의 균형점은 약 120 kHz 공진 조건에서 공진대역폭 내인 1 kHz 근처에서 형성됨을 확인하였다. 이는 공진대역폭 f_0/Q 와 일치한다. 일반적으로 WPT의 목적은 통신성능보다는 전력전송 효율이 우선시되므로 이보다 낮은 주파수 천이를 갖는 것이 일반적이다.

3-2 역방향 인밴드 통신 시뮬레이션 결과

다음으로 부하 변조를 이용한 역방향 인밴드 통신 링크의 성능은 BER(bit error rate) 성능을 중심으로 분석하였다. 시뮬레이션 대상 시스템은 송신기와 수신기가 직렬 공진 구조(series-series topology)를 가지는 2-coil 자기유도 WPT 시스템으로 구성되며, 수신기 부하 임피던스를 식 (13)과 같이 두 개의 상태로 ASK 변조함으로써 이진 데이터를 전송한다. 이때 송신기에서는 입력 전류의 변화를 관측하여 수신기에서 전송된 정보를 복조하며, 검출은 실제 Qi 표준에서 사용하는 임계값 기반 방식(threshold detection)을 사용하였다. 이 방법은 0과 1 비트의 입력 전류 크기 차이를 기반으로 비트를 판별한다. 마지막으로 실제 시스템에서

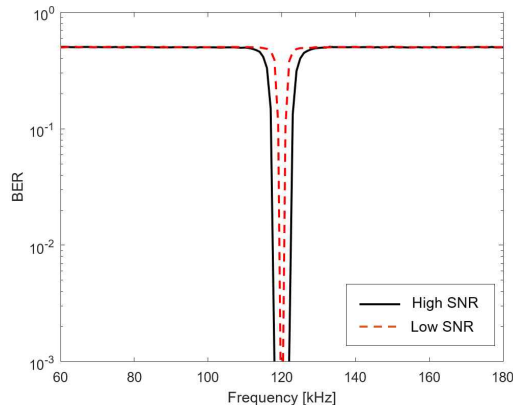


그림 5. 주파수와 SNR에 따른 역방향 부하변조의 BER 성능

Fig. 5. BER performance of reverse link load modulation w.r.t. operating frequency and SNR.

발생하는 스위칭 노이즈, EMI 및 측정 잡음을 반영하기 위해 입력전류 신호에 가우시안 잡음을 추가하였다.

표 1의 시뮬레이션 파라미터를 기반으로 BER 성능을 분석한 결과는 그림 5 및 그림 6과 같다. 본 논문에서 제시된 모든 BER 결과는 동일한 load modulation 기반 수신 모델을 사용하여 계산되었으며, 각 성능 분석은 하나의 파라미터만을 변화시키는 방식으로 수행되었다.

먼저 공진 주파수 주변에서 동작 주파수를 변화시키면서 BER 성능을 분석하였고 그 결과는 그림 5와 같다. 시

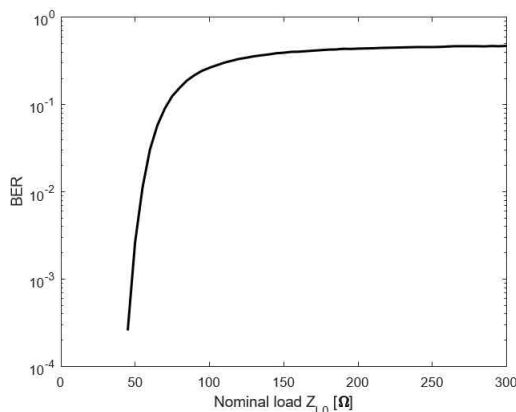


그림 6. 부하임피던스에 따른 역방향 BER 성능

Fig. 6. BER performance of reverse link load modulation w.r.t. load impedance.

물레이션 결과, BER은 공진 주파수 f_0 근처에서 부하변조에 따른 입력 전류변화가 잡음 대비 충분히 크게 나타나므로 BER이 0에 수렴하는 이상적인 특성을 보인다. 반면 공진 주파수에서 벗어나갈수록 BER 성능이 급격히 나빠지는 경향을 보인다. 이는 II장에서 도출된 순방향 전달 함수 $H_{ac}(\omega, Z_L)$ 및 역방향 채널 민감도 H_{lw} 이 공진 조건에서 최대가 되는 특성과 일치한다. 특히 공진 주파수에서는 부하 변조에 따른 입력 전류 변화가 최대화되므로, 검출 신호 간의 분리도가 증가하고 BER이 최소화된다. 반면, 공진 조건에서 벗어나면 채널 민감도가 감소하여 동일한 부하 변조에 대해서도 전류 변화가 작아지고, 이에 따라 BER이 증가하게 된다. 또한, 송신기의 잡음을 10배 증가시켜 SNR(signal to noise ratio)을 낮추어 동일한 시뮬레이션을 수행한 결과 유사한 특성을 나타내지만 주파수 선택도에는 차이가 발생함을 알 수 있었다. SNR이 높을수록 공진주파수에서 벗어나도 어느 정도 통신성능을 얻을 수 있지만 SNR이 낮으면 조금만 공진주파수가 바뀌어도 통신성능이 나빠지게 됨을 확인하였다.

다음으로 그림 7은 송신기와 수신기 간의 결합계수 k 를 변화시키면서 BER 성능을 분석하였다. 분석 결과 결합계수가 증가할수록 BER 성능이 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 결합계수가 증가함에 따라 상호 인덕턴스 M 이 증가하고, 이에 따라 송신기 입력 전류가 수신기 부하 변화에 더욱 민감하게 반응하기 때문이다. 반대로 결합계

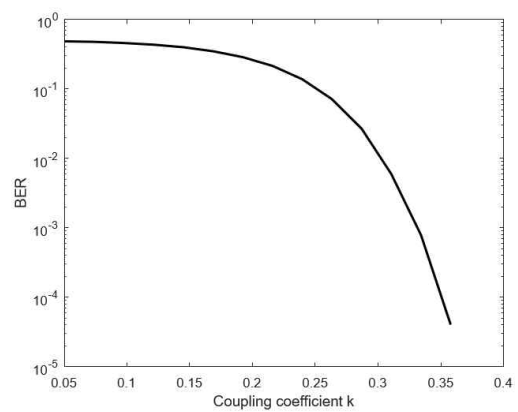


그림 7. 결합계수에 따른 역방향 BER 성능

Fig. 7. BER performance of reverse link load modulation w.r.t. coupling coefficient.

수가 감소하는 경우, 부하 변조에 따른 전류 변화량이 감소하여 검출 성능이 저하되고 BER이 증가하게 된다.

세 번째로 그림 7과 같이 수신기 부하의 기준값 Z_{L0} 를 변화시키면서 BER 성능을 분석하였다. 시뮬레이션 결과, 특정 부하 임피던스에서 BER이 최소가 되는 최적 동작점이 존재하며 이는 부하임피던스가 작을 때 최대가 됨을 확인하였다. 이는 수신기가 송신전류의 변화를 관찰함으로써 부하임피던스가 작을 때 송신전류가 최대가 되기 때문이다. 이는 WPT 채널이 부하 임피던스에 직접적으로 의존하는 채널 특성을 가지는 것을 보여준다. 즉, 동일한 결합계수와 주파수 조건에서도 부하 상태에 따라 채널 특성이 변화하며, 이는 통신 성능에 직접적인 영향을 미치게 된다.

IV. 실제 Qi 표준 사례

본 장에서는 현재까지 분석된 결과가 현재 상용화된 유도형 무선전력전송 시스템의 대표적인 표준단체인 Wireless Power Consortium에서 제정한 Qi 표준에서는 실제 어떻게 사용되는지 살펴본다^{[6],[7]}. Qi 표준에서는 전력전송과 동시에 송신기(Tx)와 수신기(Rx) 간의 인밴드(in-band) 통신이 필수적으로 사용되며, 이는 전력제어, 상태보고 및 안전기능을 수행하기 위한 저속 제어 채널로 동작한다.

먼저 역방향 인밴드 통신(Rx→Tx)은 수신기의 부하 임피던스를 미세하게 변조하는 부하변조 방식으로 구현된다. 이는 RFID 및 backscatter communication에서의 부하변조와 유사한 물리적 메커니즘을 가지며, WPT 시스템을 원거리 RF backscatter와 구별되는 근접장 결합 기반의 near-field backscatter 채널로 해석할 수 있다^{[9],[10]}. Qi 표준의 WPT 장치의 경우 수신기는 부하 임피던스를 변조하고, 이 변조된 신호는 입력 전류의 변화로 송신기에 역산란되어 전달된다. 현재 Qi 표준에서 역방향 통신 속도는 약 2 kbps 수준으로 알려져 있으며, 이는 전력 제어 정보 전달에는 충분하지만 고속 데이터 전송에는 제한적이다.

반면, 순방향 통신(Tx → Rx)은 송신기의 동작 주파수를 미세하게 변화시키는 FSK 방식으로 구현된다. 이 경우 데이터율은 동작 주파수 f_{op} 에 비례하며 일반적으로 식 (17)과 같이 표현된다.

$$data\ rate = f_{op}/512 \quad (17)$$

Qi 시스템의 동작 주파수 범위가 약 110~205 kHz임을 고려하면, 순방향 데이터율은 약 200~400 bps 수준으로 매우 낮은 값을 가진다.

이러한 데이터 속도를 기반으로 실제 패킷 전송 시간을 분석하면, 최소 메시지(약 40~50 bit)는 역방향 링크에서 약 20 ms, 순방향에서는 약 100~200 ms가 소요된다. 또한, 긴 메시지의 경우 순방향 링크에서는 1초 이상의 지연이 발생할 수 있다. 이와 같은 결과는 Qi 인밴드 통신이 본질적으로 초저속(low-rate), 고지연(high-latency), 및 제어 중심(control-oriented) 채널임을 의미하며, 이는 기존 RF 통신 시스템과 근본적으로 다른 특성을 가짐을 의미한다. 특히, 이러한 제한된 통신 성능은 채널 상태 추정, 정밀도 제한, FOD 판단을 위한 정보 부족, 고속 센싱/피드백 불가능, 다중 디바이스 환경에서의 확장성 부족을 발생시킨다. 따라서 향후 WPT 시스템에서는 인밴드 통신 성능 향상이 중요한 연구 주제가 될 수 있다. 표 3은 본 논문에서 제안한 WPT 채널 모델과 실제 Qi 표준의 주

표 3. 제안한 WPT 채널모델과 실제 Qi 표준 특성 비교
Table 3. Comparison between the proposed WPT channel model and practical Qi standard characteristics.

Item	Qi standard	This paper
Operating frequency	110~205 kHz (Qi 1.x) 360 kHz (Qi 2.0MPP)	Resonance observe at 120/360 kHz
Forward-link modulation	FSK	frequency-selective resonant channel (FSK)
Forward-link data rate	200~400 bps	Limited by resonant settling time
Forward-link Δf	<1 kHz	Δf constrained within resonant bandwidth
Reverse-link modulation	Load modulation (ASK)	Near-field backscatter channel (ASK)
Coupling coefficient (k)	0.1~0.4	Coupling-depended channel
Load impedance	Tens to hundreds of Ω	Load-depended channel
Resonant bandwidth	$\approx f_0/Q$	Q-factor governs communication
Q-factor effect	High-Q in Qi2.0 MPP	Memory-link channel

요 특성을 비교한 결과를 보여준다. 비교 결과, 제안한 채널 모델은 Qi 표준에서 사용되는 순방향 FSK 통신, 역방향 부하변조 통신, 공진 기반 협대역 특성 및 결합계수와 부하 변화에 따른 통신 특성을 잘 설명할 수 있음을 확인하였다. 특히 높은 Q-factor에 의해 제한되는 순방향 데이터율 특성과 부하변조 기반 역방향 BER 특성은 실제 Qi 시스템의 동작 특성과 잘 일치함을 확인하였다.

앞서 분석한 바와 같이, 현재 Qi 기반 WPT 시스템은 다음과 같은 구조적 한계를 가진다. 먼저, 인밴드 통신은 매우 저속이며 채널 정보 전달 능력이 제한적이다. 그러나 실제 WPT 시스템에서는 부하 임피던스 변화, 결합계수 변화, 이물질 존재가 모두 동일한 물리적 채널 변화를 유발하며, 이는 송신기 입력 전류 및 전압에 직접적으로 반영된다. 따라서 WPT 시스템은 단순한 전력 전달 회로가 아니라, 부하에 의해 정의되는 근접장 공진 채널로 해석될 수 있으며, 순방향 및 역방향 인밴드 통신, 전력 전달을 하나의 통합된 채널 모델로 분석할 필요가 있다. 이를 통해 향후 Qi 시스템의 인밴드 통신 성능의 개선에 활용될 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 무선전력전송(WPT) 시스템의 순방향 및 역방향 인밴드 통신을 무선채널 관점에서 통합하여 해석하였다. 기존 무선통신과 레이다의 무선채널과는 달리 WPT 무선채널은 송신기와 수신기 간 상호결합, 공진 특성, 및 수신기 부하에 의존하는 특성을 갖기 때문에 메모리효과를 가진 초협대역 주파수 선택적 무선채널로 모델링될 수 있다. 이러한 무선채널 모델링을 기반으로 동작 주파수, 결합 계수 및 부하 조건에 따른 순방향 링크의 통신성능 및 역방향 링크의 BER 성능을 분석하였다. 시뮬레이션 결과 순방향 링크의 경우 전력전송 효율, 검출 용이성, 데이터 전송 속도의 트레이드 오프 관계가 있으며, 역방향 링크 성능은 공진 주파수 근처에서 최대화되며 부하 동작 지점에 크게 의존함을 보여준다. 이론의 결과를 검증하기 위하여 시뮬레이션을 통해 이론의 타당성을 확인하였고, 실제 Qi 표준과 비교한 결과를 본 연구에서 제안한 해석이 타당함을 확인할 수 있었다. 본 연구는

WPT 시스템의 인밴드 통신의 성능 개선이 필요한 현 시점에서 의미가 있다고 사료되며, 향후 WPT의 새로운 표준에 활용될 수 있기를 기대한다.

References

- [1] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljačić, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 83-86, Jul. 2007.
- [2] S. Li, C. C. Mi, "Wireless power transfer for electric vehicle applications," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 4-17, Mar. 2015.
- [3] B. Clerckx, R. Zhang, R. Schober, D. W. K. Ng, D. I. Kim, and H. V. Poor, "Fundamentals of wireless information and power transfer: From RF energy harvester models to signal and system designs," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 37, no. 1, pp. 4-33, Jan. 2019.
- [4] S. Bi, C. K. Ho, and R. Zhang, "Wireless powered communication: Opportunities and challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 4, pp. 117-125, Apr. 2015.
- [5] M. Fu, T. Zhang, C. Ma, and X. Zhu, "A review of the state of the art in wireless power transfer," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 11, pp. 9153-9163, Nov. 2018.
- [6] Wireless Power Consortium (WPC), *S Qi Specification Version 2.0*, WPC, Apr. 2023.
- [7] Wireless Power Consortium (WPC), *Qi Specification Version 2.2*, WPC, Apr. 2025.
- [8] B. L. Cannon, J. F. Hoburg, D. D. Stancil, and S. C. Goldstein, "Magnetic resonant coupling as a potential means for wireless power transfer to multiple small receivers," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 7, pp. 1819-1825, Jul. 2009.
- [9] Z. N. Low, R. A. Chinga, R. Tseng, and J. Lin, "Design and test of a high-power high-efficiency loosely coupled planar wireless power transfer system," *IEEE Transactions*

- on *Industrial Electronics*, vol. 56, no. 5, pp. 1801-1812, May 2009.
- [10] A. P. Sample, D. T. Meyer, and J. R. Smith, "Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 2, pp. 544-554, Feb. 2011.
- [11] M. Ishii, K. Yamanaka, and M. Sasaki, "Multiple FSK data and power transmission system using magnetic resonance wireless power transfer," in *2019 IEEE Wireless Power Transfer Conference(WPTC)*, London, Jun. 2019. pp. 208-211.
- [12] K. Finkenzeller, *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication*, 3rd ed., Chichester, John Wiley & Sons, 2010.
- [13] V. Liu, A. Parks, V. Talla, S. Gollakota, D. Wetherall, and J. R. Smith, "Ambient backscatter: Wireless communication out of thin air," in *SIGCOMM '13: Proceedings of the ACM SIGCOMM 2013 Conference on SIGCOMM*, New York, NY, Aug. 2013, pp. 39-50.
- [14] M. Kiani, M. Ghovanloo, "An RFID-based closed-loop wireless power transmission system for biomedical applications," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II*, vol. 57, no. 4, pp. 260-264, Apr. 2010.
- [15] S. Y. Hui, "Planar wireless charging technology for portable electronic products and Qi," *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1290-1301, Jun. 2013.

장 원 호 [(주)수니/CTO]

<https://orcid.org/0009-0009-2289-6016>



1986년 2월: 항공대 항공전자공학과 (공학사)
 1988년 2월: 항공대대학원 전자공학과 (공학석사)
 2003년 8월: 항공대대학원 정보통신공학과 (공학박사)
 1992년 10월~2001년 2월: 한국통신 본사 위성사업단

2001년 9월~2005년 9월: 기지국/단말기안테나 개발 제조업체
 2006년 3월~2007년 7월: 서울산업대 전자장, 초고주파공학 강의
 2007년 6월~2010년 12월: 한국전파진흥원 부설 전자파측정센터
 2011년 1월~2026년 4월: 한국전파진흥협회 전파진흥본부
 2026년 4월~현재: (주)수니 기업부설연구소 CTO
 [주 관심분야] 안테나, 무선전력전송, 표준개발

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] RF 회로 및 시스템, 무선 시스템, 전파응용