

전기 자동차 무선 충전 시스템 기술 동향 및 분석

임종균* · 이동용**

A Technology Trend and Analysis of Electric Vehicle Wireless Charging System

Jong-Gyun Lim* · Dong-Yong Lee**

요 약

최근 화석연료의 고갈로 인해 전기 자동차의 중요성이 점차 커지고 있다. 전기 자동차를 사용하기 위해서는 자동차에 내장된 배터리를 수시로 충전해야 한다. 전기 자동차는 소음, 진동에 있어 매우 뛰어난 성능을 구현한다. 하지만 배터리의 한계상 1회 충전 시 주행거리가 내연 자동차보다 상당히 짧으며, 배터리 충전 시간도 주유 시간에 비해 상대적으로 매우 오래 걸린다는 단점이 있다. 전기 자동차용 배터리를 충전하는 방식은 플러그인 방식과 무선 충전 방식이 있다. 본 논문에서는 전기 자동차용 무선 충전 기술에 대한 소개와 주요 국가의 기술 개발 현황 및 표준을 소개하였다.

ABSTRACT

The importance of electric vehicles is gradually increasing due to the recent depletion of fossil fuels. In order to use an electric vehicle, the battery built into the vehicle must be frequently charged. Electric vehicles has very good performance in terms of noise and vibration. However, due to the limitations of the battery, the mileage is considerably shorter than that of an internal combustion engine vehicle once it is charged, and the battery charging time is relatively long compared to the refueling time. There are two types of charging methods for electric vehicle batteries: plug-in and wireless charging. In this paper, we introduced the wireless charging technology for electric vehicles and the current state of technology development and standards in major countries.

키워드

Wireless Power Transfer, Electric Vehicle, Resonance Frequency, Charging Efficiency, Electromagnetic Wave
무선 전력 전송, 전기 자동차, 공진 주파수, 충전 효율, 전자파

1. 서 론

무선 전력 전송 기술은 기존의 전선을 이용하여 전력을 전달하는 방식과는 달리, 전선 없이 전력을 전달할 수 있는 기술을 말한다[1-4]. 무선 전력 전송 기술

이 일상생활에 완전히 보급화 된다면, 각종 전기·전자 기기를 사용하기 위해 집안에 설치된 콘센트를 찾아다닐 필요가 없어지게 된다. 즉, 사용자가 원하는 곳 어디에서나 전력을 공급받을 수 있게 된다. 하지만 무선 전력 전송 기술은 전자파에 대한 인체 유해성

* 한국폴리텍대학 스마트전자과(jglim@kopo.ac.kr)

** 한국폴리텍대학 전기과(dongyong@kopo.ac.kr)

* 교신저자 : 한국폴리텍대학 스마트전자과

• 접수 일 : 2021. 01. 22

• 수정완료일 : 2021. 03. 05

• 게재확정일 : 2021. 04. 17

• Received : Jan. 22, 2021, Revised : Mar. 05, 2021, Accepted : Apr. 17, 2021

• Corresponding Author : Jong-Gyun Lim

Dept. Smart Electronic Engineering, Korea Polytechnics,

Email : jglim@kopo.ac.kr

여부가 끊임없이 대두되고 있다. 전자파에 대한 인체 유해성 여부를 명확히 판별하기 위해서는 시험환경과 조건, 대상, 관련 규정 등이 고려되어야 한다. 최근 전기 자동차 무선 충전 분야의 경우 그 어떤 분야보다도 활발한 연구가 진행 중이다. 전기 자동차 무선 충전 시스템은 기존의 플러그인 방식의 유선 충전 방식을 개선하여 운전자가 주차장에 주차만 하더라도 자동으로 무선 충전이 되는 시스템을 구현하는 것을 목표로 한다. 최적의 시스템을 구현하기 위해서는 무선 충전 효율, 이물질에 대한 회피 및 제거 방안, 통신 방식, 과금 방식 등의 충전 인프라에 관한 사항과 차량의 배터리 용량, 무선 전력 수신기의 모듈화 및 자동차 탑재 등의 전기 자동차에 관한 사항 등이 고려되어야 한다. 현재 이러한 사항을 반영하여 국내의 많은 연구 기관이나 단체에서 표준화 작업을 진행 중이다. 전기 자동차 무선 충전 시장 규모는 해마다 증가하고 있으며, 관련 시장을 선점하기 위해서는 전기 자동차 무선 충전 인프라에 대한 관련 규정과 표준을 선제적으로 이끌어 나가는 것이 매우 중요하다.

본 논문에서는 무선 전력 전송 기술에 대해 간략히 살펴보고, 전기 자동차 무선 충전 시스템이 상용화되기 위한 국, 내외 표준 동향을 살펴보고자 한다.

II. 무선 전력 전송 기술 동향

무선 전력 전송 시스템은 크게 전력을 전송하는 송신부와 전력을 수신하는 수신부로 구성된다. 애플리케이션 및 송, 수신부 코일 간의 간격에 따라 자기 유도 방식, 자기 공진 방식, 전자기파 방식 등으로 구분된다[1-2]. 현재 가장 많이 상용화된 기술은 자기 유도 방식으로 스마트폰, 전동칫솔 등 애플리케이션이 다양하다. 자기 유도 방식은 수 mm 이내에서 높은 전력 전송 효율을 구현할 수 있는 장점이 있다. 하지만 송, 수신부 코일 간의 거리가 멀어질수록 전력 전송 효율은 급격히 저하되는 단점이 있다. 자기 유도 기술을 이끄는 대표적인 단체로 WPC(wireless power consortium)가 2008년에 설립이 되었다. 이 단체에서는 Qi라는 표준을 제정하여 출력 전력, 코일 형태, 애플리케이션에 따라 세부 사양을 정의하였다. 자기 유도 방식의 제품을 개발하기 위해 TI(texas

instruments), Freescale 등 수 많은 기업에서 무선 충전 Solution IC를 제공하고 있다. 국내에서는 경북테크노파크의 무선 전력 전송 기술 센터(wireless power transfer technology center)에서 제품 설계부터 시험, 인증까지의 전 과정을 지원해주고 있다. 그림 1에서는 자기 유도 방식의 기본 시스템 구조를 보여주고 있다[5].

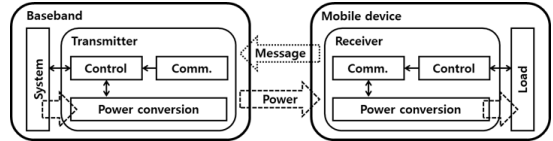


그림 1. 자기 유도 방식의 무선 전력 전송 시스템
Fig. 1 Magnetic induction WPT system

자기 공진 방식은 자기 유도 방식의 짧은 전력 전송 거리를 보완하여 더욱 먼 거리에서 전력을 전달할 수 있는 기술이다[1-2]. 그림 2에서는 자기 공진 방식의 시스템 구조를 보여주고 있다[5].

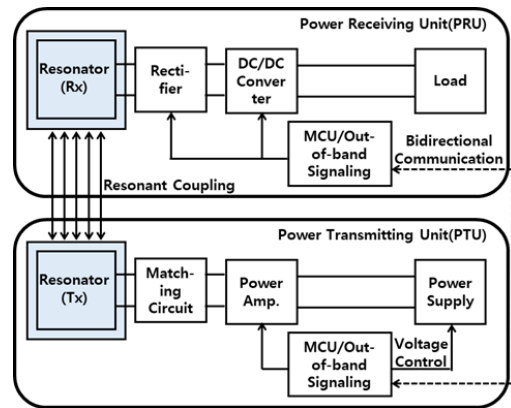


그림 2. 자기 공진 방식의 무선 전력 전송 시스템
Fig. 2 Magnetic resonance WPT system

자기 공진 기술을 이끄는 대표적인 단체로 PMA(power matters alliance)와 A4WP(alliance for wireless power)가 있으며 2014년에 통합되어 하나의 Airfuel Alliance를 출범하였다. 현재 Airfuel Alliance를 통해 인증 받은 제품은 18개 제품이 있으며, 인증 받은 제품은 크게 전력 송신부(PTU, power transfer

unit)와 전력 수신부(PRU, power receiver units)로 구분되며, 주요 애플리케이션은 스마트폰, 웨어러블 디바이스, PC 모니터 등이 있다. 주요 인증받은 업체는 Witricity, Qualcomm, Apple 社 등이 있다.

현재까지 자기 공진 방식의 무선 전력 전송 시스템의 애플리케이션은 주로 50W 미만의 소출력 무선 충전 기술이 시장에 많이 보급되어왔다. IHS Markit에 따르면 2017년에 3억 달러의 시장 규모가 형성되었으며, 2025년에는 20억 달러 수준에 다다를 것으로 분석하였다. 차세대 무선 전력 전송 시장은 출력 전력을 많이 증가시키어 수 kW급 이상의 무선 전력 전송 기술이 확대되어 갈 가능성이 매우 크다. 대표적인 애플리케이션으로는 전기 자동차용 무선 충전 시스템이다.

전기 자동차 무선 충전 기술은 매우 광범위한 요소들을 고려해야 하므로 소형 가전 시장에 적용된 무선 충전 기술과 비교해 복잡성과 고려해야 할 요소들이 상당히 많다. 하지만 아직은 상용화 및 국제 표준화 작업이 다른 분야에 비해 느린 편이다. 그나마 최근 2019년 국제전기통신연합(ITU, international telecommunication union)에서 전기 자동차용 무선 충전을 위한 핵심 요소들에 대해 정리하였다. 보고서에 따르면 국가별 무선 전력 전송 표준에 대한 사항과 주파수 선정, 전자파 허용 기준 등에 관한 내용이 정의되어있다[5]. 이하에서는 전기 자동차 무선 충전 시스템의 핵심 요소 중 주파수 선정, 충전 효율, 전자파 허용 기준에 대해 자세히 언급하고자 한다.

2.1 주파수 선정

전기 자동차용 무선 전력 전송 시스템의 호환을 위해서는 주파수 선정이 매우 중요하다. 이상적인 상황의 경우 전 세계 모든 국가의 무선 전력 전송용 주파수가 같다면, 사용자와 개발자로서는 매우 편리할 것이다. 현재 ISM(industrial scientific and medical equipment) 밴드를 포함한 국가별 무선 전력 전송용 사용 가능 주파수는 표 1과 같다[6-7].

표 1과 같이 국가별 사용 주파수가 상이하여 개발 제품에 대한 국가별 호환에 대한 문제가 발생할 가능성이 매우 크다. 앞에서 언급한 바와 같이 가장 이상적인 경우는 하나의 주파수 대역을 공통으로 사용하는 것이지만 국가별 주파수 사용 배분 및 사용 방법이 다르므로 현실적으로는 불가능하다.

표 1. 무선 전력 전송 주파수 및 규제
Table 1. Wireless power transmission frequency and regulation

Country	Band	Power limit
Korea	80kHz ~ 100kHz	50W max.
	130kHz ~ 150kHz	
	323kHz ~ 405kHz	
	1.6MHz ~ 1.8MHz 6.78MHz, 13.56MHz (ISM)	
Japan	10kHz ~ 10MHz	50W max.
	13.56MHz (ISM)	
	27.12MHz (ISM)	
	40.68MHz (ISM)	
China	105kHz ~ 205kHz	NA
	6.8MHz(ISM)	
United States	Under 500kHz	NA
	6.78MHz	
	13.56MHz	

표 2. 우리나라 무선 전력 전송 규정
Table 2. Applied regulations to WPT in Korea

Power level	Name of application	Applied technical regulations
Low power ($\leq 50W$)	ISM equipment WPT device using the frequency range of 100 ~ 205kHz	Weak electric field strength
	ISM equipment WPT device using the frequency range of 6765 ~ 6795kHz	ISM
High power ($\geq 50W$)	ISM equipment using the frequency range 19 ~ 21kHz, 59 ~ 61kHz	ISM

또한 해당 주파수의 고조파(harmonics) 특성으로 인해 다른 대역의 간섭을 발생시킬 수 있는 요인이 있는지를 파악해야 한다. 국내의 무선 전력 전송에 대한 전력 크기별 주파수 사용에 대한 정의는 표 2와 같다[5].

표2와 같이 동일한 애플리케이션 일지라도 전력량의 크기에 따라 사용할 수 있는 주파수 대역이 달라진다. 앞으로 세계 시장에서 우리나라의 전기 자동차 무선 충전 시장 점유율을 선점하기 위해서는 무선 충전 주파수에 대한 세계 표준을 선도적으로 주도해나갈 필요가 있다.

2.2 충전 효율

전기 자동차의 무선 충전 효율을 정의하기 위해서는 전기 자동차 무선 충전 시스템을 정의해야 한다. 크게 3가지 영역으로 구분할 수 있는데, 상용전원에서 무선 전력의 형태로 변환하는 인버터 효율(η_{pa}), 전력 송신부와 수신부 사이의 무선 전력 전송 효율에 관한 코일 효율(η_{coil}), 전기 자동차 내부의 전력 수신부와 배터리 직류 전압의 형태로 변환하는 컨버터(정류부 포함) 부 효율(η_{rec})로 살펴볼 수 있다. 또한 이들 모두를 포함한 전체 시스템 효율(η_{sys})로 정의할 수 있다.

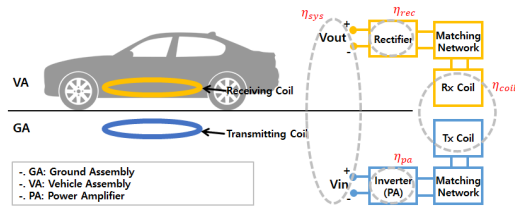


그림 3. 전기 자동차 무선 충전시스템 효율 정의
Fig. 3 Electric vehicle wireless charging system efficiency definition

표3에서 제시된 전기 자동차용 무선 전력 전송 시스템의 전력 및 효율 분류에 따르면 J2954에서는 Light duty 전기 자동차에 대해 WPT1/2/3/4로 정의하였다. WPT1은 최소 충전 전력 공급 용량으로 3.7kVA이며, WPT4는 최대 충전 전력 공급 용량으로 22kVA이다. 즉, 전기 자동차 무선 충전소 설치 시 사업자는 수요를 고려한 적절한 용량을 선택하여 설치하게 되며, 사용자는 자신의 자동차와 호환이 되는 충전기에서 충전을 해야 한다. 또한 J2954에서는 각 공급 전력 장치간의 호환성에 대한 규정도 정의되어있다. 시스템 효율은 기본적으로 송, 수신 간에 코일이

정렬되었을 경우와 정렬이 완벽히 되지 않았을 경우로 구분하여 각각 85%, 80% 이상으로 규정하였다[8].

표 3. 전기 자동차용 무선 전력 전송 시스템의 전력 및 효율에 대한 분류

Table 3. WPT power and efficiency classifications for EV

f=85kHz	WPT1	WPT2	WPT3	WPT4
Power(kVA)	3.7	7.7	11	22

무선 충전 효율을 향상하기 위해서는 송, 수신간의 코일 정렬이 매우 중요하다. 그림4에서는 송, 수신 코일 간의 정렬이 되었을 때와 어긋났을 때의 상태의 S-parameter를 도시하였다. 사용된 코일은 지름 200mm의 원형 헬리컬 코일로 실험하였다. 실험에 사용된 장비는 network analyzer를 이용하였으며, S21을 측정하여 송, 수신 코일간의 정렬 상태에 따른 효율(η_{coil}) 변화를 도시하였다[9].

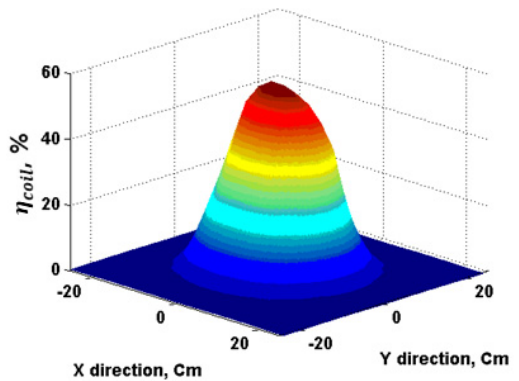


그림 4 송, 수신 코일 정렬 상태에 따른 효율
Fig. 4 Efficiency according to the alignment of the Tx and Rx coils

실험에 따르면, 송, 수신 코일 간의 정렬 조건에 따라 효율 특성이 크게 달라지는 것을 볼 수 있다. 따라서 고효율 전기 자동차 무선 충전시스템을 구축하기 위해서는 차량에 부착된 수신 코일과 지면에 놓인 송신 코일의 위치를 얼마나 정확한 위치에 정렬시키는가에 따라 달려있다고 볼 수 있다. 현재 전기 자동차

에 무선 충전 기술을 적용한 사례로 해외에서는 대표적으로 Witricity와 있으며, 국내에서는 그린파워가 있다[10-11]. Witricity는 3.6~11kW급의 90~93% 충전 효율을 구현한다¹⁾. 그린파워는 3.3~6.6kW급의 90% 이상의 효율을 구현한다²⁾. 이 밖에도 BMW, Toyota, 현대자동차 등이 출시하였거나 준비 중이다.

2.3 전자파 허용 기준

무선 전력 전송 기술에 대한 중요 이슈 중의 하나가 전자파에 대한 인체 영향에 대한 것이다. 국제표준은 국제전기기술위원회(IEC) 산하 단체인 무선장해특별위원회(CISPR)에서 개발하고 있다[12]. 전기 자동차 분야는 CISPR B에서 다루고 있으며, CISPR A에서는 전자파 장애 시험방법과 시험장소 조건 등이 정의되어 있다³⁾.

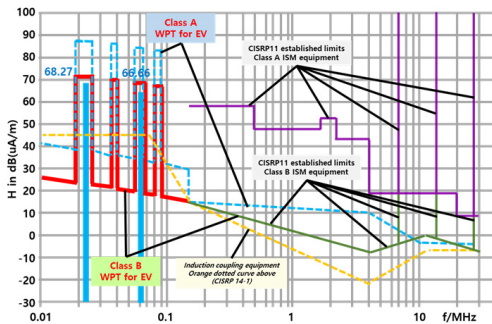


그림 5. CISPR B에서 제한한 H-Field 제한
Fig. 5 H-Field limits adopted in the CISPR B

앞에서 언급된 전자파 허용 기준에 따라 많은 연구 기관 및 완성차 업체에서 제품을 출시하고 있다. 하지만 상기 전자파 노출량에 대하여 인체에 대한 유해성이 명확히 밝혀지지 않은 이상 앞으로 이 분야에 대해 지속해서 많은 연구가 필요할 것으로 생각된다.

III. 결 론

전기 자동차 무선 충전시스템을 구축하기 위해서는 앞서 본문에서 다룬 요소 외에도 상당히 중요한 요소들이 많이 있다. 예를 들어 이물질 탐지 및 회피 기술, 충전스테이션과 차량 간 통신 기술, 과금 시스템 등이 있으며, 이 모든 요소가 체계적인 규정 및 표준 아래에 완성이 되어야 전기 자동차 무선 충전 시대를 맞이할 수 있을 것이다. 과거에는 주로 미국을 비롯한 해외 국가에서 주로 기술과 표준을 선도해 왔지만, 앞으로 우리나라에서도 더 많은 활동을 통해 적극적으로 표준안을 제시하는 것이 전기 자동차 무선 충전 시장을 선점하는 데 매우 유리한 고지에 올라갈 수 있는 지름길일 것이다.

References

- [1] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M. Soljacic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," *Annals of Physics*, vol. 323 no. 1, Jan. 2008 pp. 34-48.
- [2] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Science*, vol. 317, no. 6, July 2007 pp. 83-86.
- [3] C. Yoon, "Study on the design of high efficient class-E power amplifier and resonant coils for high efficient wireless power transfer system," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 11, no. 10, 2016, pp. 935-940.
- [4] H. Jung and I. Choy, "Magnetic Beamforming for Optimum Efficiency Wireless Power Transfer," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 15, no. 1, 2020, pp. 79-84.
- [5] ITU-R, "Wireless power transmission using technologies other than radio frequency beam," *Report ITU-R SM.2303-2*, June 2017.
- [6] Y. Won and S. Lim, "International standards for

1) <https://witricity.com/>

2) <http://www.egreenpower.com/>

3) <https://www.iec.ch/>

wireless power transmission and industrial technology trends," *J. of the Korean Institute of Communication Sciences*, vol. 30, no. 11, 2013, pp. 52-59.

- [7] TTA, "Frequency trends of wireless charging electric vehicles," *ICT Standard Weekly*, June 2020.
- [8] T. Campi, S. Cruciani, F. Maradei, and M. Feliziani, "Magnetic field during wireless charging in an electric vehicle according to standard SAE J2954," *Energies*, vol. 12, no. 9, 2019.
- [9] K. Lee, H. Yang, and I. Ra, "Comparison of achievable efficiency for different resonator structures in a magnetic resonance-based wireless power transfer system," *J. of The Korean Institute of Communication Engineering*, vol. 21, no. 5, 2017, pp. 1035-1041.
- [10] J. Wang, S. Ho, W. Fu, and M. Sun, "Analytical design study of a novel witrlicity charger with lateral and angular misalignments for efficient wireless energy transmission," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 10, Oct. 2011, pp. 2616-2619.
- [11] S. Ho, J. Wang, W. Fu, and M. Sun, "A comparative study netween novel Witrlicity and traditional inductive magnetic coupling in wireless charging," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 5, May 2011, pp. 1522-1525.
- [12] S. Yun, "Wireless interference standardization status(CISPR)," *TTA Journal*, vol. 168, 2016, pp. 40-45.

저자 소개



임종균(Jong-Gyun Lim)

2015년 건국대학교 대학원 전자
정보통신공학과 졸업(공학박사)
2019년 한국폴리텍대학 부산캠퍼스
스마트전자과 조교수

2020년 ~현재 한국전자통신학회 정회원
2019년 ~현재 산업기술교육훈련학회 정회원
※ 관심분야 : 무선통신시스템, 무선전력전송시스템



이동용(Dong-Yong Lee)

2020년 경남대학교 대학원 첨단
공학과 졸업(공학석사)
2017년 한국폴리텍대학 부산캠퍼스
전기과 조교수

2021년 ~현재 한국전자통신학회 정회원
2019년 ~현재 산업기술교육훈련학회 정회원
2015년 ~현재 대한전기학회 정회원
※ 관심분야 : 전기제어시스템, 무선전력전송시스템