

전원무결성과 신호무결성을 갖는 전기차 무선전력전송 무선충전 컨트롤모듈 EMI 저감 설계

홍승모*

Design of EMI reduction of Electric Vehicle Wireless Power Transfer Wireless Charging Control Module with Power Integrity and Signal Integrity

Seungmo Hong*

요약 전 세계적으로 전기차 시장이 확대됨에 따라 성능 및 안전성의 문제를 보완한 친환경적인 전기차가 계속 출시되고 시장이 더욱 커지고 있다. 하지만 전기차의 경우 충전의 불편함, 감전과 같은 안전 문제, 여러 전자부품들의 연동으로 인한 EMI(Electromagnetic interference) 문제는 전기차에서 해결해야 하는 문제이다. 무선전력전송 기술을 이용하면 전기차 충전에 대한 불편함 해소와 고전류, 고전압을 직접 다루지 않아 안전성의 문제를 해결할 수 있으나 EMI 저감을 위한 설계가 이루어지지 않는다면 오작동을 일으켜 더 큰 문제를 일으킬 수 있다. 본 논문은 전기차 무선전력전송 핵심 전자 부품인 무선충전컨트롤모듈에서 발생할 수 있는 EMI를 저감시키기 위한 전원무결성과 신호무결성을 갖는 전기차 무선전력전송 무선충전컨트롤모듈 EMI 저감 설계하였다. 전원부분에서 발생할 수 있는 공진, 임피던스 등의 문제와 신호 부분에서 발생할 수 있는 고속통신간의 신호왜곡의 문제를 시뮬레이션을 통해 EMI 저감 설계하였다. 따라서 전원무결성과 신호무결성을 갖는 EMI 저감 설계를 통해 전기차 무선전력전송 무선충전컨트롤모듈 800 MHz ~ 1 GHz 대역과 1.5 GHz에서 각각 10 dBu V/m, 15 dBu V/m이 저감되는 것을 확인하였다.

Abstract As the global electric vehicle (EV) market expands, eco-friendly EV that complement performance and safety problems continue to be released and the market is growing. However, in the case of EVs, the inconvenience of charging, safety problems such as electric shock, and electromagnetic interference (EMI) problems caused by the interlocking of various electronic components are problems that must be solved in EVs. The use of wireless power transmission technology can solve the problem of safety by not dealing with high current and high voltage directly and solving the inconvenience of charging EVs. In this paper, in order to reduce EMI a wireless charging control module, which is a key electronic component of WPT of EV. EMI reduction was designed through simulation of problems such as resonance and impedance that may occur in the power supply and signal distortion between high-speed communication that may occur in the signal part. Therefore, through the EMI reduction design with power integrity and signal integrity, the WPT wireless charging control module for electric vehicles reduces 10 dBu V/m and 15 dBu V/m, respectively, in 800 MHz to 1 GHz bands and 1.5 GHz band.

Key Words : Electromagnetic Interference, Electric Vehicle, Power Integrity, Signal Integrity, Wireless Power Transfer

*Department of Telecommunication Engineering, Soongsil University

*Corresponding Author : Department of Telecommunication Engineering, Soongsil University (omnu@ssu.ac.kr)

Received November 30, 2021

Revised December 04, 2021

Accepted December 09, 2021

1. 서론

탄소 배출과 같은 환경문제는 전 세계적으로 항상 대두되는 문제로 이를 해결하기 위하여 세계적으로 전기차 보급이 장려되고 있다. 또한 기존의 전기차가 가지고 있는 성능과 안정성의 문제를 해결하여 현대자동차, 테슬라 등 많은 회사들이 새로운 전기차를 출시하고 있으며, 그에 따른 전기차 시장도 매우 확대되고 있다. 전기차의 경우 다른 일반적인 자동차와 같이 충전 및 주유가 필요하지만 일반적인 자동차와 달리 고전압, 대전류를 인가해야하기에 감전 및 여러 문제가 발생할 수 있다. 이러한 불편함과 안전성의 문제는 무선전력전송 방식을 전기차에 적용하여 해결할 수 있다. 현재 많은 전장부품 기업들에서도 이를 적용하기 위해 각종 연구를 진행하고 있다.[1]

전기차 무선전력전송 방식의 경우 자기유도방식을 이용하며, 무선전력전송 자기유도방식의 경우 매우 짧은 전송거리에서 높은 전송효율을 갖으며, 송수신 코일의 위치 및 오정렬 등의 문제로 전송효율을 크게 감소시키는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 메타물질 무선전력전송 방식을 이용하여 전송거리에 따른 충전효율을 늘리는 방법과 자율주차, 센서 및 통신기술들을 활용하여 최적의 충전효율이 되도록 하는 위치를 조절하는 다양한 융 복합 연구들이 진행되고 있다.[2-3]

메타물질을 사용할 경우 송수신 코일 외에 다른 구조체를 넣어야 하므로 공간상의 제약이 따르게 되고 최적의 충전효율을 갖는 융 복합적인 방법을 사용할 경우 공간상의 제약이 해결되지만 다양한 전장부품을 사용하기에 EMC (Electromagnetic Compatibility) 와 관련된 문제들이 발생하게 된다. EMC의 경우 EMI (Electromagnetic Interference)와 EMS (Electromagnetic Susceptibility)로 분류할 수 있다. EMI는 전자파 간섭으로 전장부품이 다른 기기에 전자파를 통해 오작동을 일으키는 것이며, EMS는 전자파에 대한 내성으로 다른 기기의 전자파로부터 전장부품 방지하는 것이다. 전기차의 경우 많은 문제를 발생시키는 것은 EMI이므로 초기설계부터 EMI 사전검증 및 저감을 위한 기술연구가 활발히 진행되고 있다.[4]

본 논문은 무선전력전송 방식을 전기차에 적용할 때, 여러 융 복합적인 기술들의 결합으로 최적의 충전효율을 가지는 방식의 핵심 전장부품인 무선충전컨트롤모듈 EMI 저감 연구를 통해 전기차 무선전력전송 무선충전컨트롤모듈의 EMI 문제를 개선하고자 한다. 무선충전컨트롤모듈이란 무선전력전송 시스템을 이용하여 차량과 충전소에서 통신으로 충전을 제어하는 시스템으로 여러 전장부품들 및 통신기술들의 사용으로 인해 EMI 문제를 발생시킨다. 따라서 본 논문은 전원무결성, 신호무결성을 갖는 시뮬레이션을 통해 공진해석, 임피던스 해석, TDR 해석을 진행하였으며, 결과적으로 전기차 무선전력전송 무선충전컨트롤모듈의 EMI를 저감시키고 사전 설계에서 EMI 문제를 예측할 수 있을 수 있다.

2. 본론

2.1 전기차 무선충전컨트롤 모듈 EMI 저감을 위한 전원무결성

전원무결성이란 전원과 접지에서 발생하는 문제를 최소화하여 오작동을 방지하는 것을 뜻하며, 전원에서 발생하는 전자파와 관련된 전원단의 안정적인 전원공급을 위한 설계과정 중 하나이다. 전장부품의 전자부품의 경우 불완전한 전원으로부터 잡음이 발생하게 되며, DC-DC 컨버터 및 전력소자부품의 전원단 스위칭 부품들과 마이크로컨트롤러 동작 시 발생하는 스위칭 주파수에 따른 잡음 소스가 발생하여 오작동을 일으키게 된다. 대표적인 불안정 전원 발생은 로드단 전력소모이다. 전장부품에서 전원의 이동에 따른 약간의 전압변동이 발생하는 경우와 다르게 로드단에서는 스위칭 소자의 on/off 동작에 따른 순간전류로 잡음성 전압변동이 발생하여 누적된 과전류로 인한 모듈 전원단 전체에 영향을 끼쳐 잡음을 발생시키게 된다. 따라서 전기차 무선전력전송 전원무결성을 위해 잡음을 일으킬 수 있는 공진주파수, 임피던스 등에 대한 문제를 사전에 검증해야 한다. 특히 고속 스위칭 동작으로 인해 높은 동작주파수의 경우 인덕턴스 및 저항의 기생성분이 증가하게 되며, 이는 전압 잡음을 일으켜 오작동, 전자파 문제 및 제품 수명에 문제를 발생시킨다.

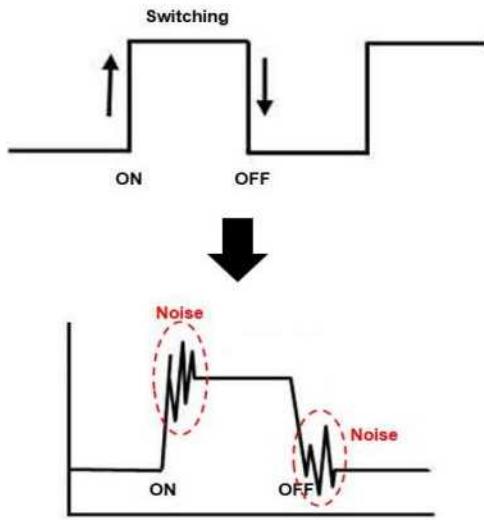


그림 1. 전원 스위칭 시 잡음 발생
Fig. 1. Power switching noise

공진 주파수의 경우 식 (1)처럼 나타낼 수 있으며, 전자부품의 경우 PCB가 층별로 배치되어 전원배선과 신호배선 그리고 소자 부품들 간에 의해 발생된다. 또한 동작주파수와 하모닉 주파수를 통해 발생하는 잡음은 전자파문제를 발생시키는 큰 요인으로 EMI 저감을 위한 전원무결성을 위해 공진 문제를 우선적으로 해결해야 한다.

$$Resonance\ Frequency = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \times C}} \quad (1)$$

전기차 무선전력전송에서 공진 문제를 해결하기 위해서 공진 해석을 해야 한다. 공진에 따른 잡음 발생 과정은 그림 2와 같으며, 공진 해석이란 PCB의 전원과 접지 간에 발생하는 구조적인 공진을 분석하는 것으로 층별로 배치되어 있는 전자부품의 전원단을 고려하여 모양, 크기 및 배치에 의한 해석하여 공진 발생을 막는 것이다. 모양, 크기 및 배치에 의해 공진이 발생하면 해당 주파수에서 높은 임피던스 특성을 가지고 되며, 이는 작은 전류에도 큰 전압 잡음을 발생시키는 원인이 된다.

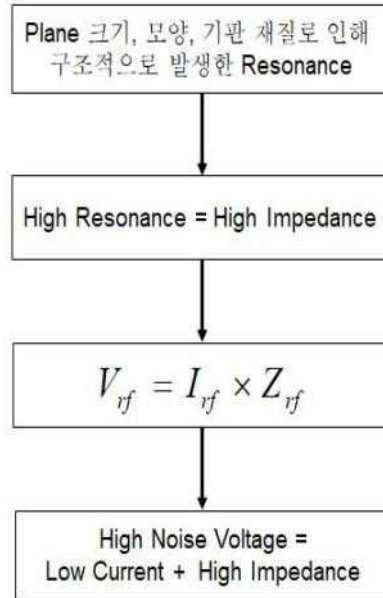
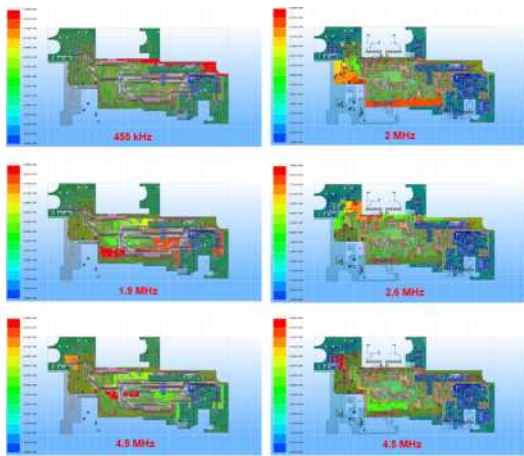


그림 2. 공진에 따른 잡음 발생 과정
Fig. 2. Process of noise according to the resonance.

공진 해석을 위해 Ansys사의 Siwave 시뮬레이션을 이용하였으며, 실제 무선충전컨트롤모듈과 같은 환경 조건에서 공진해석을 진행하였다. 그림 3 (a)을 통해 시뮬레이션 상에서 무선충전컨트롤모듈의 환경을 설정하였으며, 그림 3 (b)을 통해 주파수 무선충전컨트롤모듈의 수동소자와 PCB의 물리적 구조에 의한 공진에 의한 잡음 발생을 확인할 수 있다. 전원단의 공진 현상은 내층을 연결하는 수동소자의 기생성분 및 선편에 따라서 공진이 발생하게 되며, 발생된 공진 공간에서 전원에 따른 스위칭 주파수가 만나면서 여러 주파수 값을 가지게 된다. 이는 잡음문제를 일으키게 되는 되며, 시뮬레이션을 통해 EMI 문제를 발생시킬 수 있는 영역을 사전에 확인할 수 있다.



(a)



(b)

그림 3. 공진 해석을 위한 무선충전컨트롤모듈 시뮬레이션 (a) 무선충전컨트롤모듈 환경 설정, (b) 주파수별 무선충전컨트롤모듈 공진 해석 결과

Fig. 3. Wireless charging control module simulation for resonance analysis (a) Wireless charging control module environment setting, (b) Resonant analysis result of wireless charging control module by frequency

전원무결성을 위해 공진 문제 외에 임피던스 문제를 해결해야 한다. 임피던스 특성은 주파수에 따라 달라지며, 전원 배선에서 저항 특성을 가지고 있기에 이를 임피던스 저항으로 볼 수 있다. 임피던스 특성은 배선의 인덕턴스와 저항에 따라 임피던스가 커지고 작아지는 값을 결정짓게 되며, 식 (2), (3)과 같이 임피던스 수식을 나타낼 수 있다.

$$Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \quad (2)$$

$$\text{임피던스 } (Z) = \text{전압 } (V) / \text{전류 } (I) \quad (3)$$

높은 임피던스를 가질 때 같은 전류에서 더 큰 전압이 발생하며, 전자파 문제를 일으키게 된다. 따라서 임피던스 해석을 통해 목표 임피던스를 정해야 하며, 이는 정확한 임피던스 값을 이용하여 전자파 개선을 통해 전원무결성을 검증할 수 있다. 그림 4는 배선에 따라 임피던스를 분석할 수 있는 임피던스 스캔이며, 스캔 결과를 바탕으로 특정 배선의 목표 임피던스를 설정하고 전체적으로 무선컨트롤모듈의 임피던스를 최적화 한다. 그림 5는 임피던스 스캔을 통한 목표 임피던스 결과 값이다.



그림 4. 무선충전컨트롤모듈 임피던스 스캔

Fig. 4. Wireless charging control module impedance scan

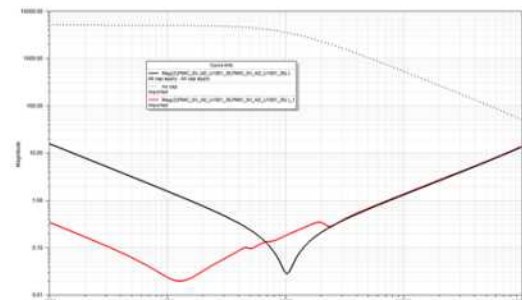


그림 5. 무선충전컨트롤모듈 임피던스 스캔 결과

Fig. 5. Wireless charging control module impedance scan result

시뮬레이션 된 결과를 바탕으로 전기차 무선충전컨트롤모듈의 전원배선들 중 스위칭 주파수를 발생시키는 부분의 임피던스를 해석하여 그림 6과 같이 잡음을 일으키지 않는 부분으로 목표 임피던스를 설정해야 한다. 목표 임피던스 해석을 이용하여 특정 주파수의 임피던스를 낮춰 잡음을 개선하고 목표 임피던스 값은 입력 전압이 허용 가능한 리플을 곱한 값을 시스템의 최대 전류로 나눠 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

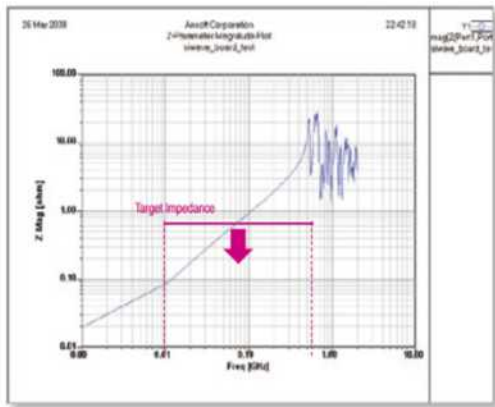


그림 6. 무선충전컨트롤모듈 목표 임피던스 설정
Fig. 6. Wireless charging control module target impedance setting

$$Target\ Impedance = \frac{\text{공급전압} \times \text{허용전압}}{\text{최대전류}} \quad (4-1)$$

$$= \frac{k \times V_{cc} \times \text{허용전압}(\%)}{loadcurrent} \quad (4-2)$$

$$= \frac{k \times V_{cc} \times \text{허용전압}(\%)}{loadcurrent} \quad (4-3)$$

$$= \frac{k \times \text{허용전압}(\%) \times t_r}{n \times c_r} \quad (4-4)$$

그림 7은 공진 해석과 임피던스 해석 시뮬레이션을 통해 잡음이 발생하는 위치를 파악하고 해당 부분 임피던스 값에 따른 전자파 분석으로 공진 해석의 결과를 이용하여 잡음 발생 위치를 임피던스 해석하고 목표 임피던스를 구해 적용하면 잡음을 개선할 수 있다.

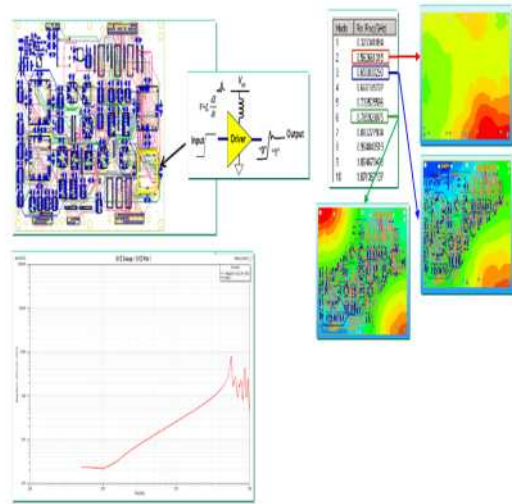


그림 7. 무선충전컨트롤모듈 임피던스 영향에 따른 잡음
Fig. 7. Noise caused by impedance effect of wireless charging control module

2.2. 전기차 무선충전컨트롤모듈 EMI 저감을 위한 신호무결성

신호무결성이란 전기신호의 안정성을 뜻하며, 송신부에서 디지털 신호가 부품과 부품간의 PCB 배선을 통해 전송될 때 수신부 신호 패턴이 왜곡 없이 안정적인 신호를 수신하는 것을 의미한다. 신호무결성의 경우 타이밍 문제, 잡음 문제 등 EMI 문제로 해석할 수 있으며, 타이밍 문제의 경우 설계 문제로 인하여 송신되는 신호가 수신부에 전달되지 않았을 경우 발생하는 문제이다. 잡음 문제의 경우 신호 파형의 반사, Cross Talk 및 접지단 설계에 의해 파형이 일그러지는 문제이다. 전자파를 고려한 전송선 설계에서 배선의 단면 모양을 일정하게 유지하고 선로의 목표 임피던스 특성에 맞게 설계하여 송수신단의 신호라인의 길이를 최대한 짧게 설계하여 신호무결성을 확보해야한다.

전장부품의 경우 고속통신을 사용하기에 신호 왜곡이 송수신부 간에서 발생하게 된다. 특히 무선충전컨트롤모듈의 경우 여러 시스템이 복합적으로 이루어졌기 때문에 디지털신호가 전송되는 중에 잡음, 감쇄현상이 발생하게 되며, 여러 신호들의 동작으로 인해 왜

곡이 발생하게 된다. 이를 방지하고 해석하기 위해서는 Eye Diagram 해석 방법을 이용하였다. Eye Diagram 해석을 위하여 전기차 무선충전컨트롤러의 송수신단 설정 및 S파라미터 모델링을 하였으며, 그림 8은 모델링 된 시뮬레이션을 나타낸다.

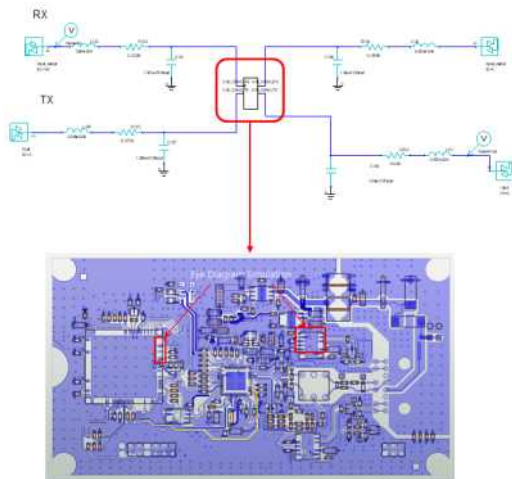
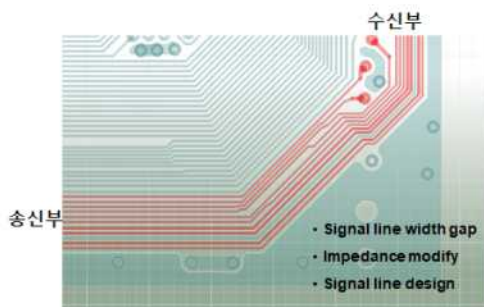
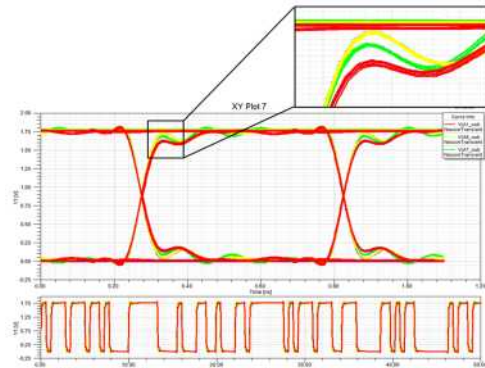


그림 8. 무선충전컨트롤모듈 Eye Diagram을 위한 송수신단 설정 및 S 파라미터 모델링
Fig. 8. Transceiver setting and S parameter modeling for eye diagram of wireless charging control module

그림 9는 Eye Diagram를 이용한 무선충전컨트롤 모듈 신호무결성을 위한 신호라인 시뮬레이션 결과이며, 디지털 왜곡을 개선시킬 수 있음을 확인하였다.



(a)



(b)

그림 9. Eye Diagram를 이용한 무선충전컨트롤모듈 송수신단 신호무결성 신호 라인 시뮬레이션 (a) 시뮬레이션 설정, (b) 시뮬레이션 결과
Fig. 9. Simulation of signal integrity signal line of wireless charging control module transceiver using eye diagram (a) Simulation setting, (b) Simulation result

전기차는 무선전력 전송 시 무선충전컨트롤러를 이용하여 최적 효율을 갖도록 배터리 충전 시간, 충전량, 안전 등의 데이터 신호 및 제어하고 통제한다. 전기차의 충전과 관련된 디지털 신호의 신호무결성은 가장 중요한 부분으로 신호왜곡 발생이 차량의 큰 문제로 발생할 수 있다. 따라서 전기차 충전과 관련된 신호무결성 검증이 필수적이고 이를 위하여 TDR(Time Domain Reflectometer) 해석을 이용하여 신호 왜곡을 검증하였다. TDR은 전송선로의 반사 및 반응 값을 측정하는 것으로 전송선로를 통해 얼마나 신호를 잘 전달하였는지를 판단할 수 있다. 이를 위해 반사계수를 사용하며, 반사계수의 경우 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho(\text{반사계수}) = \frac{V_{\text{reflected}}}{V_{\text{incident}}} \quad (5-1)$$

$$\rho(\text{반사계수}) = \frac{V_{\text{reflected}}}{V_{\text{incident}}} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (5-2)$$

그림 10은 전기차 무선충전컨트롤모듈의 통신 신호

간의 TDR 해석을 나타내며, 기준 신호를 입력단에 인가하여 전송 선로 중단 및 이상점에서 반사되는 신호를 검출한다. TDR 해석을 진행하기 위하여 50Ω을 기준으로 설계된 전송선로에서 임피던스 부정합을 목표 임피던스로 최적화하는 설계를 진행하였으며, 시뮬레이션 결과를 통해 입력부터 왜곡까지 시간을 측정하고 TDR 왜곡 거리 계산을 통해 왜곡이 발생하는 위치를 사전에 찾을 수 있다.

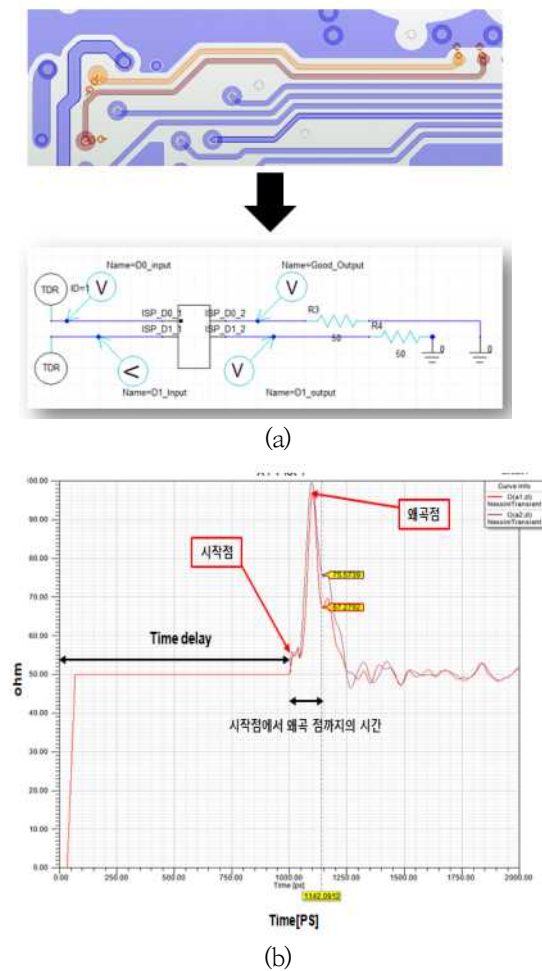


그림 10. 무선충전컨트롤모듈 TDR 해석 (a) 회로 구성, (b) 시뮬레이션 결과
 Fig. 10. Wireless charging control module TDR analysis (a) Configuration of circuit, (b) Simulation result

2.3. 전원무결성과 신호무결성을 갖는 무선충전컨트롤모듈 시뮬레이션

전원무결성을 갖는 시뮬레이션을 진행하여 오작동을 일으킬 수 있는 부분을 확인하고 기생성분 및 공진의 문제를 해결하여 안정적인 수동소자 값을 선정하고 최적의 임피던스 값을 찾는다. 신호무결성을 갖는 시뮬레이션을 진행하여 신호 왜곡 발생부분을 확인하여 최적의 임피던스 값을 갖는 신호라인의 선포의 크기를 선정한다. 따라서 전원무결성과 신호무결성을 갖는 시뮬레이션을 통해 공진 해석, 임피던스 해석 및 TDR 해석을 이용하여 무선충전컨트롤모듈 EMI 저감 설계를 진행한다. 그림 11은 전원무결성을 위한 전기차 무선충전컨트롤모듈 전원에 대한 최적화 설계로 기존 모듈과 최적화 모듈을 비교하였다. 그림 12는 신호무결성 위한 전기차 무선충전컨트롤모듈의 신호 라인 최적화 설계로 기존 모듈과 최적화 모듈을 비교하였다.

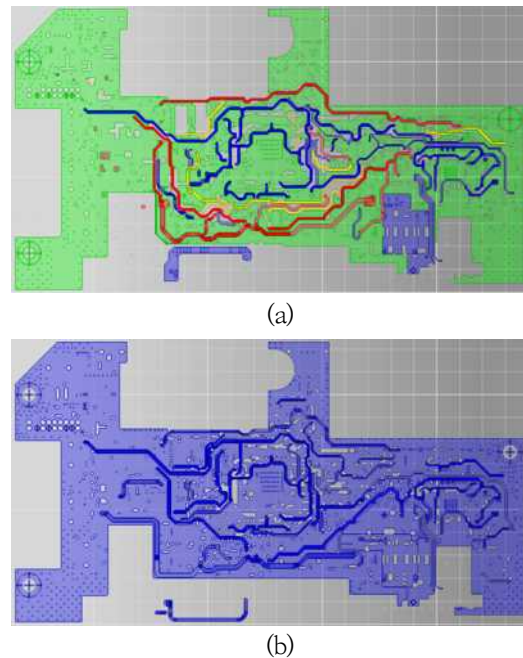
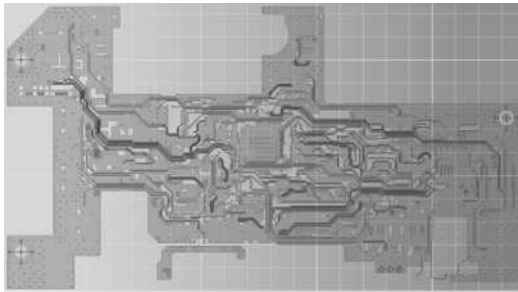
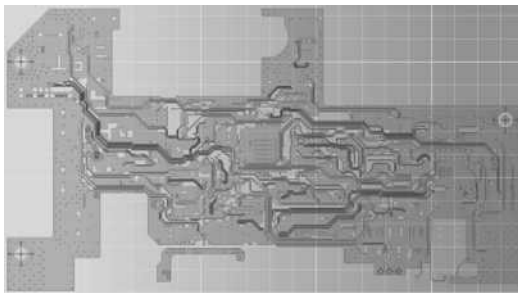


그림 11. 무선충전컨트롤모듈 전원 라인 설계 비교 (a) 기존 모듈, (b) 최적화 모듈
 Fig. 11. Wireless charging control module power line design comparison (a) Normal module, (b) Optimization module



(a)



(b)

그림 12. 무선충전컨트롤모듈 신호 라인 설계 비교 (a) 기존 모듈, (b) 최적화 모듈

Fig. 12. Wireless charging control module signal line design comparison (a) Normal module, (b) Optimization module

그림 13은 전원무결성과 신호무결성 최적화 설계를 진행하여 나타낸 결과로 전자파가 높게 발생하는 주파수 대역인 800 MHz ~ 1 GHz 대역에서 10 dBu V/m 감소하고 1.5 GHz에서 15 dBu V/m 가 감소하는 것을 확인하였다. 표 1은 그림 13에 대한 비교 결과표이다.

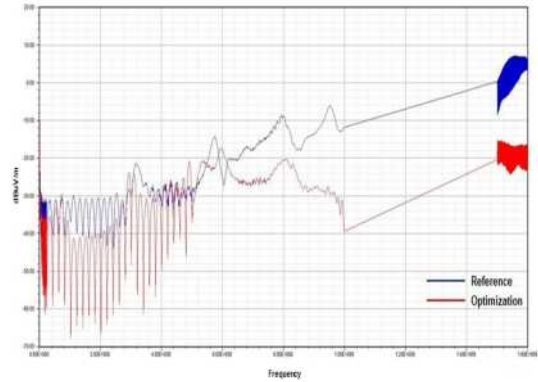


그림 13. 무선충전컨트롤모듈 EMI 저감 시뮬레이션 결과
Fig. 13. Wireless charging control module EMI reduction simulation result

표 1. 무선충전컨트롤모듈 EMI 저감 시뮬레이션 비교 결과표

Table 1. Comparison table of wireless charging control module EMI reduction simulation

Frequency(MHz)	Reference (dBuV/m)	Optimization (dBuV/m)
800	-9.2	-20.3
850	-18	-28
900	-13.8	-27.5
950	-6	-27.4
1000	-12	-39
1500	-4.3	-19.3

3. 결론

본 논문은 전기차 무선전력전송에서 사용되는 핵심 전장부품인 무선충전컨트롤모듈에서 발생하는 EMI를 저감시키기 위해 전원무결성과 신호무결성을 갖는 무선충전컨트롤모듈 설계를 진행하였다. 엄격해지는 EMC 표준과 사전 설계에서 발견하고 해결해야하는 EMI 문제를 Ansys사의 시뮬레이션을 통해 설계하고 검증하였다. 그 결과 800 MHz ~ 1 GHz 대역에서 10 dBu V/m 감소하고 1.5 GHz에서 15 dBu V/m 가 감소하는 것을 확인하였으며, 본 연구를 통해 전원무결성을 통한 PCB 전송선로 및 전원 스위칭 신호의 안정화, 신호무결성을 통한 통신시스템간의 고속데이터 신호의 안정화를 이루었으며, 결과적으로 전기차 무선

전력전송 무선충전컨트롤모듈의 EMI를 저감시키는 효과를 얻었다.

REFERENCES

- [1] Tommaso Campi, et al, "EMC and EMF safety issues in wireless charging system for an electric Vehicle(EV)", 2017 International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automatic Ve, pp 15-16, Jun. 2017.
- [2] Kwan-Young Park, Seung-In Yang, "High Gain Metamaterial Patch Antenna for 2.4 Band using New Metamaterial Single-Layer", Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers, vol. 50, no. 6, pp. 56-61, Jun. 2013.
- [3] J. Wang, S. L. Ho W.N. Fu and M. Sun, "Analytical design study a no charger with lateral and angular misalignments for efficient wireless energy transmission," IEEE Trans. Magnetics, vol. 47, no. 10, pp. 2616-2619, Oct. 2011.
- [4] Byeong-In Choi, Sung-Hoon Choi, "EMI Reduction Filter Design using Heat Sink", The Institute of Electronics and Information Engineers, vol. 57, no. 12, pp. 3-13, Dec. 2020.

저자약력

홍 승 모 (Seungmo Hong)

[정회원]



- 2018~ 현재 숭실대학교 전자정보공학부 IT융합학과 교수

〈관심분야〉 마이크로파, 안테나, 신호처리