

실용적 설계 방안을 통한 자동차 시트의 무선전력전송 시스템 전력 효율 향상 연구

나 다 울 · 남 재 현 · 고 동 신*

고등기술연구원 기계융합시스템센터 CAE응용기술그룹

A Study on Power Efficiency Enhancement of Wireless Power Transfer Systems in Automotive Seats Based on Practical Design Approaches

Dayul Na · Jaehyeon Nam · Dongshin Ko*

¹Mechanical Convergence System Center, Institute for Advanced Engineering, 175-28 Goan-ro 51 beon-gil, Baegam-myeon, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi 17180, Korea

(Received 3 September 2025 / Revised 26 September 2025 / Accepted 26 September 2025)

Abstract : This study investigated an efficiency-enhancing design for wireless power transfer (WPT) technology to accommodate varying operating conditions of autonomous vehicle seats. In the baseline design, mutual inductance was limited to approximately 70 % due to structural constraints, and power-transfer efficiency ranged from 86 % to 94 % as a function of seat translation. To improve and sustain efficiency, this research proposed a practical design approach that relies solely on the magnetic properties of ferrite cores. The featured design demonstrates an average efficiency gain of approximately 6.8 % over the baseline and achieves up to an 8.3 % increase under maximum misalignment. Consequently, even with seat translation, the system is expected to maintain a stable power supply with at least 94 % efficiency, thereby ensuring sufficient operational flexibility.

Key words : Ferrite core(페라이트 코어), Wireless power transfer(무선전력전송), Power transfer efficiency(전력전송효율), Mutual inductance(상호 인덕턴스), Coupling coefficient(결합계수), Automotive seat(자동차 시트)

1. 서 론

전기 자동차는 친환경 및 자율주행 패러다임에 대응하여 활발한 연구가 수행되고 있다.¹⁻³⁾ 전기 자동차는 내연기관의 필수요소인 파워트레인이 모터와 배터리로 대체되어 사용되기 때문에 공간의 물리적인 크기가 확장된다. 기존 내연기관의 파워트레인은 차량 공간에서 전체 차량에서 약 1/3 수준을 차지하고 있었기 때문에 공간 활용 측면에서 상당한 제한 조건을 가졌다.^{4,5)} 드라이브 트레인 모듈은 구동축을 중심으로 동력을 전달하기 위한 기계적인 축들이 복잡하게 연결되어 있어, 제한된 실내 공간의 설계가 수반되었다.

전기자동차는 완전 자율주행 기능을 목표로 자율주행 기술에 대한 직접적인 연구와 완전 자율주행 기능에 대응하는 인테리어 및 부품에 대한 간접적인 많은 연구들이

수행되고 있다. 특히, 완전 자율주행은 운전자의 직접적인 개입이 필요하지 않기 때문에 운전자 및 탑승자의 차량 실내 공간 활용이 다양화될 수 있다. 자율주행 자동차에 대한 탑승자의 인식은 이동 수단에서 레저, 거주 등의 복합 생활 및 활동 영역으로 확대가 필연적이기 때문에 인테리어 공간 활용과 활동 내용에 대한 방법론이 구상되고 있다.⁶⁻⁸⁾

자율주행차의 실내 공간 설계는 기존 운전자 및 탑승자의 주행 제어를 위한 일반적인 공간에서 업무, 휴식, 실내 활동을 위한 공간 변화가 필요하다. 실내 공간은 자동차 인테리어 부품의 배치로 정의될 수 있으며, 물리적 공간 측면에서 주요 인테리어 부품은 콘솔, 자동차 시트, IP로 구성된다. 자동차 시트는 자동차 인테리어 공간 내 물리적인 부피를 큰 비율로 차지하며, 효율적 공간 배치

*Corresponding author, E-mail: dsko@iae.re.kr

¹This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

를 위한 기구적인 기능과 전자부품의 통합 기능이 활성화될 것으로 예측된다.

기존의 내연기관 시트는 주행을 위한 제한된 전/후 슬라이드 움직임과 리클라이너의 각도 조절에 의한 기구적인 움직임만이 고려되었다. 일부 편의 기능은 시트의 틸팅 기능이 추가되지만, 주행을 위한 자세나 위치를 변경하지는 않는다. 그러나 현재 개발되는 자율주행 시트는 실내 공간 배치를 위한 회전, 공간 전체의 슬라이드 또는 곡선 이동, 휴식을 위한 큰 각도의 시트 백의 움직임이 가능하도록 설계된다.

공간 배치를 위한 자율주행차용 시트는 기존 시트 대비 기구적 자유도가 확장되며, 전동화 추세로 모터를 통한 제어가 일반적이다. 모터의 작동은 와이어 기반의 전력 공급이 사용되지만 와이어 및 위치에 따른 움직임에 대한 제한 조건과 복잡한 와이어링 설계가 수반된다. 시트 배치를 위한 이동은 와이어 시스템의 반복적인 피로 하중으로 인한 내구성 문제로 단선, 단락 등 안전성에 대한 문제를 발생시킬 수 있으며, 와이어의 물리적인 길에 따라 이동에 대한 제한 조건이 설정된다. 따라서 자율주행 시트는 공간 활용과 배치 효율을 극대화하기 위해 설계적인 제약조건이 없는 안정적인 전원공급을 수행하는 기술이 필요하다.

무선전력전송은 무선으로 에너지 부하를 전달하는 기술로 최근 다양한 산업에서 적용되고 있다. 근거리 무선 전력전송 기술은 크게 두 가지 방법으로 연구되고 있지만, 에너지 전송을 위한 변환 메커니즘은 동일하다. 다만, 두 방법의 선택은 전송 위치나 설계상의 제약 조건에 따라 선택적으로 사용된다. 시스템의 이동에 따른 무선 전력전송 시스템은 제한된 설계범위 내에서 효율을 높이는 방식으로 연구되고 있다. 이승범⁹⁾ 와 장인권⁹⁾ 은 무선전력전송 시스템의 철도 적용을 위한 다양한 제한조건에서 전송 용량과 EMF 조건을 만족하면서 무게를 감소시킬 수 있는 최적설계 방법론에 대한 연구를 수행하였다. 이진복¹⁰⁾ 와 이병승¹⁰⁾ 은 국내의 무선급전기술의 발전과정을 기술하고, 최근 개발된 경전철용 무선급전시스템 기술에 대해서 대략적으로 소개하였다. 저자의 다른 논문에서는 개발된 1-MW 급 무선전력전송 시스템의 고출력화에 따른 전자기장 노출 및 전자기 간섭 문제에 대해서 연구하였으며, 시험결과를 기반으로 전자기 안전성에 대해 검증하여 상용화 가능성을 제시하였다.¹¹⁾ 이외에도 철도 시스템에서는 유도 발열 시스템과 같은 전자기적 특성을 이용한 연구가 활발히 이루어지기 때문에 일반적인 산업의 무선전력시스템 벤치마킹 모델로 이용된다.¹²⁾

자동차에서 무선전력전송시스템에 대한 연구는 무선충전기 시스템과 시트의 기구적 고자유도 시스템을 위

해 연구되고 있다. 신창수 등¹³⁾은 전동 시트용 무선충전패드 주변의 기구물에 누설되는 자속에 의한 손실을 분석하여, 최대 효율을 달성하기 위한 주요 설계 인자들도 출하였다. 김성민 등¹⁴⁾은 자기공명 방식으로 70 W 급 무선전력전송 모듈을 설계 및 제작하였으며, 평균 60 mm 거리에서 60 %이상의 DC/DC 효율을 나타내었다. 이세원 등¹⁵⁾은 구성된 자동차 시트용 롱레일 무선전력전송 시스템에 대해 국제 가이드라인 기반으로 자기장 강도를 비교하였다. 제안된 설계는 26 W 급 무선전력 전송 시 실효값이 가이드라인에 부합하지만, 전력 증가 및 환경 변화에 따라 인체 보호기준을 초과할 수도 있다고 조사하였다. 무선전력 전송 시스템은 자동차 시트에서 기구적인 움직임의 자유도를 확장하기 위해 다양한 선행 기술을 기반으로 적용되고 있다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 선행 연구된 자기유도방식의 무선전력전송 시스템을 기반으로 전력 효율 증대를 위한 실용적 설계 방안에 대해서 기술하였다.^{16,17)} 제안된 연구는 무선전력전송시스템의 효율 증대 방안이 주요 목표이며, FEM 시뮬레이션 모델을 통해 자율주행 차량에서 적용될 수 있는 페라이트 설계 변경을 적용한 실용적 설계 방안에 대해서 제시하였다.

2. 본 론

2.1 직렬-직렬 토폴로지 WPT 시스템

회로설계는 무선전력 전송 시스템의 직렬-직렬 회로

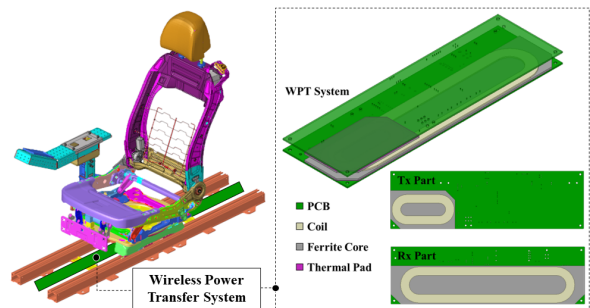


Fig. 1 Wireless power transfer system

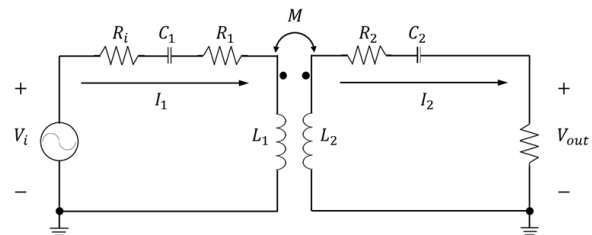


Fig. 2 Linear equivalent circuit in the S-S topology

로 구성하였다. 직렬-직렬 회로는 높은 효율을 가지고 있으며, 회로의 구성이 상대적으로 단순하여 빠른 해석이 가능하다. 그러나 회로도에는 기하학적 특성 및 물성 등의 비선형적인 특성을 반영할 수 없다. Fig. 2는 직렬-직렬 회로의 무선전력 시스템에 대한 AC 등가 회로를 표현하였으며, FEM 모델도 동일한 회로가 적용되었다. 직렬-직렬 회로는 임피던스의 값으로 정의된 파라미터를 기반으로 페라이트 특성 반영이 물리적으로 갖는 의미에 대해서 논의하였다. 여기서 R_i 는 전압의 내부저항, M 은 상호 인덕턴스를 의미한다.

Quality factor는 ESR(Equivalent Series Resistances)에 의해 분할된 특성 임피던스에 정의된다. R_x 와 T_x 의 전압은 Kirchhoff's 법칙에 의해 정의되며, 두 시스템의 선형 관계는 행렬 형태로 다음과 같이 표현된다.¹⁸⁾

$$\begin{bmatrix} V_i \\ (R_i + R_1) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$A_{11} = -j(Q_1/1 + R_i/R_1)(1/\omega_N - \omega_N^2) + 1 \quad (2)$$

$$A_{12} = j\omega_N k_1(Q_1/1 + R_i/R_1) \quad (3)$$

$$A_{21} = j\omega_N k_2(Q_1/1 + R_{eq}/R_2) \quad (4)$$

$$A_{22} = -j(Q_2/1 + R_{eq}/R_2)(1/\omega_N - \omega_N^2) + 1 \quad (5)$$

여기서 V_i , V_{out} , I_1 , I_2 는 각각 입력 전압, 출력 전압, T_x 의 전류, R_x 의 전류이다. 회로에 사용된 기호와 정의된 파라미터는 Table 1에 요약하였다.

무선전력전송 시스템의 효율 특성을 분석하기 위해

Table 1 Symbols and description

Symbol	Description
L_1, L_2	Self-inductance
C_1, C_2	Capacitor
R_1, R_2	Total Equivalent series resistance
R_i	Internal resistance
k	Coupling coefficient
$\omega_N = (\omega_0/\omega)$, ω_0 : operating frequency, ω : resonance frequency	Frequency ratio
Q_1, Q_2	Quality factor

문제를 단순화하였다. 각 파라미터는 $L_1 = L_2 = L$, $C_1 = C_2 = C$, $k_1 = k_2 = k$, $R_1 = R_2 = R$, $Q_1 = Q_2 = Q$ 그리고 $R_i = 0$ 과 같이 각각 단순화하였다. 단순화된 두 시스템의 선형관계는 다음과 같이 전개할 수 있다.¹⁶⁾

$$\begin{bmatrix} V_i/R \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & jkQ \\ jk(Q/1+r_d) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

단순화된 시스템 매트릭스로부터, 출력전력은 각 코일의 회로를 흐르는 가지전류로부터 다음과 정리된다.

$$P_{out} = \frac{1}{2} R_{eq} |I_2|^2 = \frac{1}{2} \frac{|I_2|^2}{R_{eq}} \frac{k^2 Q^2 r_d^2}{(k^2 Q^2 + (1+r_d))^2} \quad (7)$$

효율은 출력 전력과 입력 전력을 통해 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{R_{eq} |I_2|^2}{R(|I_1|^2 + |I_2|^2) + R_{eq} |I_2|^2} \\ &= \frac{(FOM)^2 r_d}{(1+r_d)^2 + (FOM)^2 (1+r_d)} \end{aligned} \quad (8)$$

성능지수(Figure of merit)의 정의는 다음과 같다.

$$FOM \equiv kQ \quad (9)$$

$$r_d \equiv \frac{R_{eq}}{R} \quad (10)$$

단순화된 시스템의 효율은 수학적으로 쉽게 예측할 수 있으며, 성능지수와 저항의 비는 무선전력 전송 시스템에서 성능을 결정짓는 주요한 설계 인자임을 나타낸다. 결합계수와 품질인자는 시스템 특성에 따라 결정되며, 저항의 비 또한 상호 연성되어 있는 파라미터로 정의된다.

전압이득은 무선전력전송 시스템에서 전력이 자기적으로 전달되고 회로가 공진 특성을 가지기 때문에 입력 전압에 대해 수신회로의 공진 및 결합효과로 인한 전압의 비율을 의미한다. 따라서 전압 이득은 효율과 동일하게 무선전력전송 시스템의 성능을 정의하는 중요한 지표로 다음과 같다.

$$M_{V,AC} \equiv \frac{|V_o|}{|V_i|} = \frac{FOM \cdot r_d}{FOM^2 + 1 + r_d} \quad (11)$$

페라이트는 자속을 집중시키고 누설 자속을 억제하여 결합계수의 향상, 자기손실 감소, 링킹 자속 증가 등에 기여하는 중요한 소재이다. 단순 페라이트의 상대 투자율 변화에 의한 효율 증대 효과는 결합계수와 품질 인자를 새롭게 정의하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$FOM = k_{eff}(\mu_r) \cdot Q_{eff}(\mu_r) \quad (12)$$

FOM- r_d 평면에서 페라이트 존재 유무에 따른 효율특성과 전압이득의 특성은 Figs. 3과 4에 나타냈다. 페라이트 효과는 단순 약 30% 수준으로 결합계수 성능이 향상된다고 가정하였다. 효율특성은 모든 구간에서 페라이트가 존재할 때 상대적으로 높아지는 특성을 나타내고 있으며, 페라이트의 자기 손실이 낮을수록 효율이 증대될 수 있음을 예측할 수 있다. 전압이득은 성능지수의 구간에 따라 달라지는 형태를 보인다. 전압 이득에서 성능지수의 증가는 분자도 증가 시키지만, 분모는 제곱형태로 더 빠르게 증가된다. 따라서 전압 이득은 일정 성능지수에서는 감소하거나 포화되어 페라이트가 항상 전압이득을 향상 시키지 않음을 나타낸다.

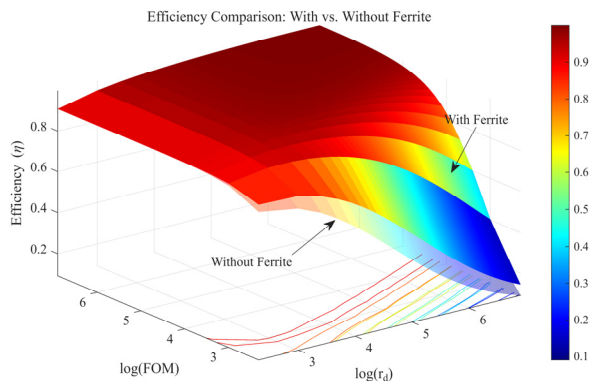


Fig. 3 Efficiency comparison in the FOM-rd plane

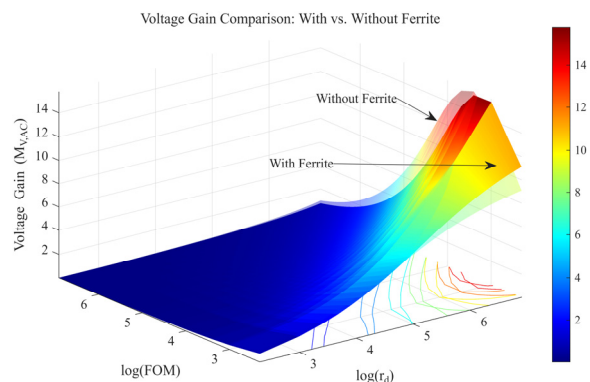


Fig. 4 Voltage gain comparison in the FOM-rd plane

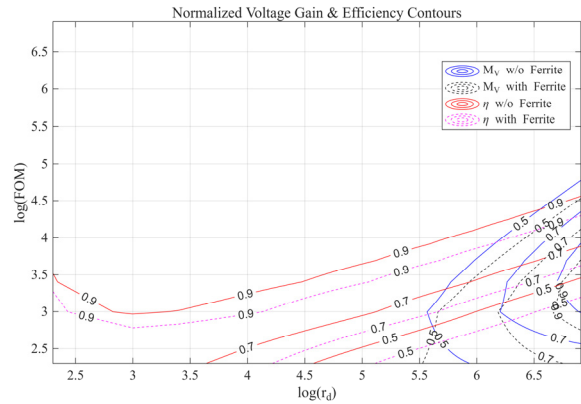


Fig. 5 Contours in the FOM - rd plane

Fig. 5는 동일 평면에서 페라이트 존재에 따른 효율과 전압 이득을 투영한 결과이다. 단순한 무선전력 전송 시스템의 설계 파라미터는 이론적 해석을 기반으로 최적화 파라미터에 대해 명확하게 나타낼 수 있지만, 연속적인 시스템에 대한 이론적인 해석은 매우 어렵다. 특히, 기하학적 형태의 비선형성이나 이동시스템은 오정렬에 의해 상호 인덕턴스가 변화, 페라이트 설계로 인한 물리적 특성 변화 등 전체 시스템에 대한 전력효율 예측이 상대적으로 복잡해진다. 따라서, 본 연구에서는 FEM을 이용하여 설계된 무선전력전송 시스템의 성능을 검증하고, 제한된 설계 범위 내에서 효율 증대를 통해 자율주행 자동차에서 적용될 수 있는 설계 방안에 대해 제시하였다.

2.2 WPT 시스템 해석 모델 및 성능분석

해석 모델은 Fig. 6과 같이 실험 모델을 기반으로 구성되었다. 해석 파라미터는 Rx 코일과 Tx 코일의 상대 이송 거리로 정의하였으며, 두 코일의 측정된 자기 인덕턴스와 코일 저항을 기반으로 커패시턴스와 등가 저항을 도출하였다. Rx 코일과 Tx 코일의 간극은 실험 모델과 동일하게 4 mm로 설정하였으며, 이송거리에 따른 상호

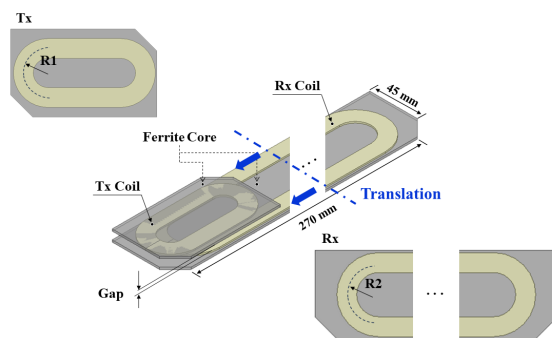


Fig. 6 Simulation model

Table 2 Simulation parameters

Parameter	Value
Input voltage [V]	48
Frequency [kHz]	83
Capacitor (C1, C2) [nF]	301.634, 146.959
Resistance (R1, R2) [ohm]	0.058, 0.106
Equivalent resistance (Req) [ohm]	4.648

인덕턴스와 효율을 FEM을 통해 도출하였다. 해석 파라미터는 Table 2에 나타냈다.

실험 모델은 Fig. 7에 나타냈다. 무선전력전송 시스템은 코일과 페라이트로 구성되었으며, 전력 손실에 의한 발열 문제를 최소화하기 위해 방열 패드 및 제어를 위한 PCB 보드가 일체형으로 설계되었다. 전력은 전원 공급기를 통해 Tx 코일에 인가되며, Rx 코일에서 거리 조절과 부하기를 통해 입력 대비 출력의 효율을 측정하였다. 효율 실험은 해석 모델과 동일하게 입력 전압 DC 48 V를 인가하였으며, 부하기를 통해 전류 제어(약 7 A)를 수행하였다.

무선전력전송 시스템은 코일의 도체손실, 자성체 코

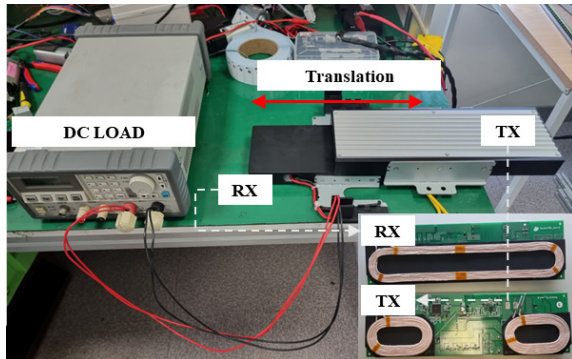


Fig. 7 Experimental setup

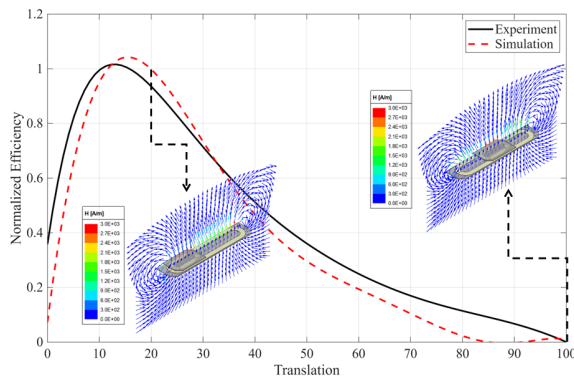


Fig. 8 Comparison of simulation and experiment with respect to displacement

어손실, 커패시터 유전체 손실 및 금속 근접부의 와전류 등에 의해 열이 발생될 수 있다. 발열은 공진 정합 및 손실 저감을 통한 효율 향상을 통해 제어하였다. 전자와 관련된 문제는 인체 노출(ICNIRP)과 EMI 관련 전자와 적합성으로 구분되며, 본 시스템에서는 전자와 차폐를 위해 알루미늄 하우징을 사용하였으며, 자기장 제어와 발열 억제를 위해 페라이트 차폐를 병행하였다.

Fig. 8은 이송 거리에 따른 실험과 해석의 무선전력전송 효율을 나타냈으며, 해석 모델의 전자기력 벡터를 가시화 하였다. 효율은 해석과 실험 모두 이송 거리에 따라 유사한 특성이 나타났다. 초기에는 오정렬에 의해 가장 낮은 효율이 발생하고, 오정렬이 최소화되는 구간에서는 효율이 극대화된다. 이후 효율은 동일한 구간을 지나면서 안정적으로 나타난다.

코일 설계는 무선전력전송 시스템의 설계상 제한 조건으로 Rx 코일과 Tx의 코일의 페루프가 일치하지 않으며, 코일의 반경이 서로 다르게 설계되었다. 오정렬에 의한 상호 인덕턴스는 노이만 방정식으로부터 유도될 수 있으며, 투자율이 일정하고, 틸트 및 회전에 의한 오정렬이 없다고 가정하면 다음과 같이 전개 될 수 있다.^{16,19)}

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{C_1} \oint_{C_2} \frac{dl_1 \cdot dl_2}{|r_1 - r_2|} \quad (13)$$

여기서, M 은 상호 인덕턴스, μ_0 는 자유 공간의 투자율, dl 은 루프 상의 미소 전류 소자, r 은 각 미소 소자의 위치 벡터, C 는 폐곡선의 경로를 의미한다. 두 루프의 세그먼트가 같다고 가정하면 임의의 두 폐곡선 사이의 이산화된 수치적 근사식은 다음과 같다.

$$M \approx \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\Delta l_{1,i} \cdot \Delta l_{2,j}}{\|r_{1,i} - r_{2,j}\|} \quad (14)$$

임의의 조건에서 두 폐곡선의 반지름 차이와 오정렬에 의한 상호 인덕턴스는 Fig. 9에 나타냈다.

Fig. 9(a)는 두 루프의 차이와 이송에 따른 오정렬 상태를 가시화 하였으며, Fig. 9(b)는 설계 제약 조건에 의한 상대적인 상호 인덕턴스이다. 두 루프는 동축 정렬 및 틸트, 회전에 의한 오정렬이 없어도 반지름이 다를 경우 자기장 결합 면적이 줄어들고 공통으로 겹치는 자기 선속 밀도가 감소하기 때문에 상호 인덕턴스는 감소한다.

현재 설계는 최초 오정렬 상태에서 오정렬이 최소화될 때 효율이 극대화되며, 일정거리로 이송된 이후에는 안정적인 출력효율이 나타날 것으로 예측할 수 있다. 상

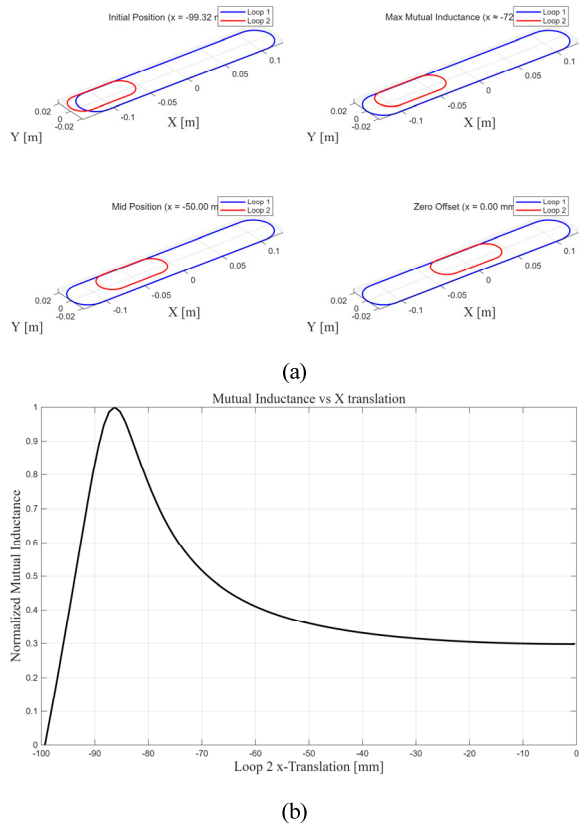


Fig. 9 Mutual inductance according to the translation (a) translation (b) mutual inductance

호 인덕턴스의 감소는 무선전력전송 효율 감소와 직접적인 영향을 미치기 때문에 현재 제한적인 설계 조건에서 효율을 극대화 할 수 있는 방안이 필요하다.

2.3 WPT 시스템 실용적 설계 방안

WPT 시스템의 효율 향상 방안은 전기적 제어 방법이 동일하게 정의될 경우 오정렬에 의한 상호 인덕턴스를 통해 결정된다. 오정렬은 틸트, 회전, 기하학적 제한 조건에 의한 코일의 페루프 곡선의 차이에 대한 두 코일 상태로 정의될 수 있다. 그러나 자율주행 자동차는 플랫폼을 기반으로 설계되며, 시트와 같이 수평 이동하는 방식을 적용할 경우 평면상 설계로 인해 설계상의 제약 조건 의한 기하학적 오정렬 외에는 효율 변화는 거의 발생되지 않는다. 효율의 향상 방안은 제한적인 오정렬만 존재한다고 가정하면, 제한된 설계 조건 내에서 코일 외부품의 기하학적 문제에서 접근하는 것이 실용적인 설계 방안으로 제안될 수 있다.

무선전력전송 효율은 자기회로 이론을 통해 예측할 수 있듯이, 전자기 시스템에서 자속을 통해 향상될 수 있다. 자속은 전류와 자기회로 구조에 의해 결정되며, 투자

율이 큰 영역을 통한 경로로부터 전체 자기 저항이 감소하여 자속이 증가하게 되고 효율이 증대된다. 효율의 향상은 직접적인 자속 증대 외에 자속 경로를 통해 향상될 수 있음을 암시한다. 따라서 실용적 설계 방안은 페라이트 설계를 통해 수행되었다.

무선전력전송 시스템에서 페라이트 코어의 역할은 자기장을 특정 방향으로 집중시켜 자기장의 경로를 형성하는 역할을 수행한다. 페라이트 코어의 설계 변경은 무선전력전송 시스템의 물리적 특성인 자기 인덕턴스, 저항, 커패시턴스, 주파수, 등가 저항을 변경시킬 필요가 없기 때문에 기존 해석 모델의 물리적인 특성과 동일하게 반영된다.

해석의 결과는 기하학적 형상에 의한 자속 경로와 비선형적인 투자율 곡선에 의한 상호인덕턴스의 결과로 나타난다. 제안된 페라이트 코어 설계는 Fig. 10과 같이 자속 경로를 집중시키기 위해 닫힌 공간에서 설계되었으며, 설계 방식에 따른 효율 특성을 분석하였다. 닫힌 공간 설계는 총 4종류의 모델로 정의하였으며, Fig. 10(a)-(d)는 각각 기본 모델('a'), Tx 페라이트 추가 모델('b'), Rx 페라이트 추가 모델('c'), Rx 및 Tx 페라이트 추가 모델('d')로 구성하였다.

의도되지 않은 페라이트 이물질은 예상하지 못한 위치로 인한 조건 교란으로 효율의 저하와 손실에 의한 발열 문제를 야기시키지만, 자속 경로 유도 효율을 고려한 페라이트 코어는 자기 차폐 효과로 인한 자속을 집중시켜 누설을 감소시킬 수 있다.²⁰⁾ 실용적 설계 방안에 대한 해석은 각 모델에 대해 Rx 코일과 Tx 코일 사이에 기준 모델과 동일한 간극(Gap)을 정의하였다. Fig. 11(a)는 각 모델의 이송 거리에 따른 전력전송효율을 나타냈으며,

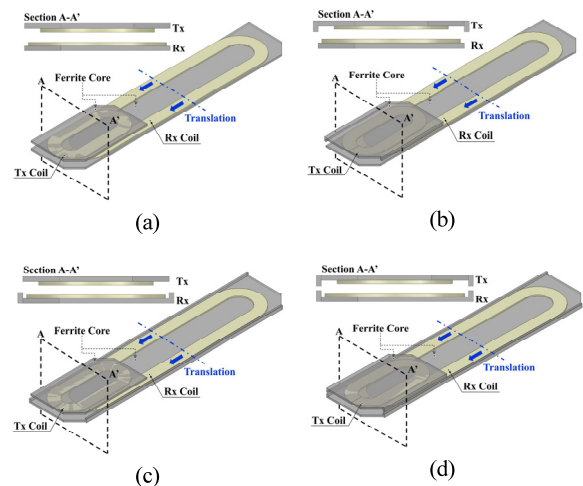
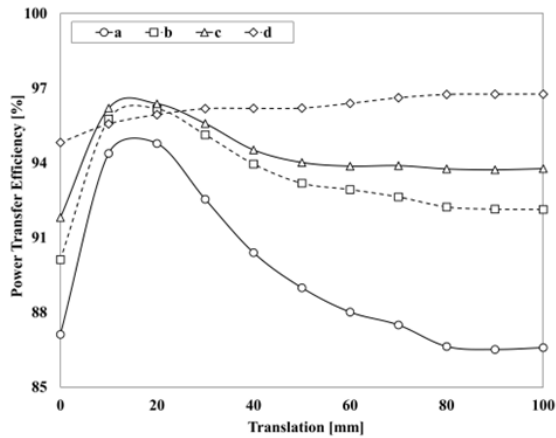
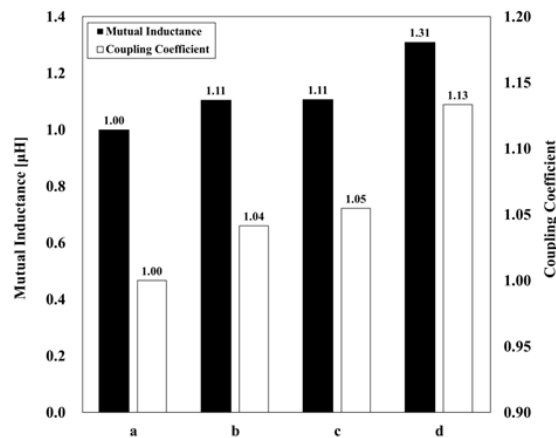


Fig. 10 Practical design for efficiency improvement (a) model 'a' (b) model 'b' (c) model 'c' (d) model 'd'



(a)



(b)

Fig. 11 Analysis results (a) efficiency vs. transfer distance (b) average mutual inductance and coupling coefficient

최대, 최소, 평균 효율은 Table 3에 나타났다.

송신부와 수신부의 페라이트 효과에 의한 자속경로 유도는 모델 'c'와 같이 수신부쪽 구조가 설계될 경우 상대적으로 이송거리에 따른 효율향상 수준이 더 높게 나타났다. 전력전송효율은 모델 'd'가 가장 높게 나타났으며, Fig. 11(b)와 같이 상호인덕턴스 및 결합계수도 모델 'd'가 가장 우수한 성능을 나타냈다. 특히, 기하학적 오정렬로 인해 결합계수 및 효율이 상대적으로 떨어지는 30 mm 지점부터 효율 성능 향상이 극대화된다. 페라이트 코어의 닫힌 구조는 무선전력전송 시스템에서 자속

Table 3 Comparison of efficiency for each model

	Model 'a'	Model 'b'	Model 'c'	Model 'd'
Min.	86.51	90.12	91.80	94.82
Max.	94.78	96.17	96.37	96.76
Avg.	89.40	93.31	94.32	96.20

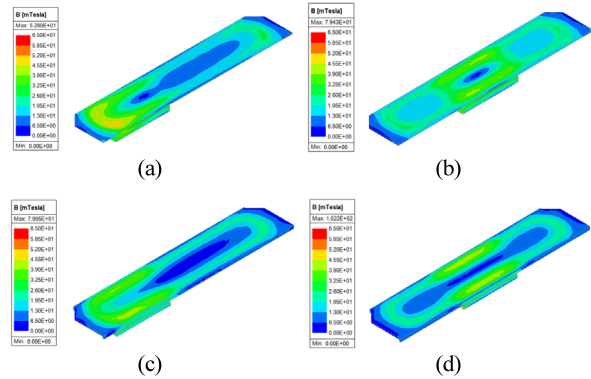


Fig. 12 Magnetic flux density according to misalignment position (a) model 'a' at 20 mm (b) model 'a' at 100 mm (c) model 'd' at 20 mm (d) model 'd' at 100 mm

경로를 집중시키기 때문에 유도 효율을 극대화 하는 것을 암시한다.

Fig. 12는 모델 'a'와 모델 'd'의 오정렬이 최소화되는 20 mm 위치와 최대화되는 100 mm 위치에서 자속밀도를 나타냈다. 자속밀도의 절대 값은 반드시 효율증대와 선형적 관계를 갖는 것은 아니지만, 수신부의 형태를 통해 무선전력전송 효율 특성을 간접적으로 가시화 할 수 있다. 오정렬이 최소화되는 20 mm 위치에서는 모델 'a'와 모델 'd'의 수신부의 자속밀도 분포가 거의 유사하게 나타난다. 그러나, 오정렬이 최대화되는 100 mm 위치에서 모델 'd'가 자속밀도의 분포가 상대적으로 수신 페라이트 내에서 균일하고 코일 형상과 유사하게 발생되었다. 이 결과는 실용적 설계 방안으로 추가된 페라이트를 따라 자속이 페루프 형태를 만들어내며, 공기중에 누설되는 자속이 페라이트로 유도되어 효율 향상에 기인하는 것을 암시한다.

3. 결론

본 연구에서는 무선전력전송 시스템에서 효율향상의 실용적 설계 방안 모색으로 페라이트 형상에 특성과 효율 차이의 원인을 전자기장 해석을 통해 분석하였다. 페라이트 개방형(열린 공간) 모델 대비 폐쇄형(닫힌 공간) 모델은 전력전송 효율, 상호 인덕턴스 및 결합계수가 상대적으로 높고, 전력손실이 낮은 것으로 분석되었다. 폐쇄형 페라이트 코어는 송신부에서 전송되는 자속의 흐름을 집중시켜 수신부로의 자기 결합을 강화하고, 자속경로의 자기 저항을 감소시켜 전력전송 효율을 개선한 것으로 판단된다. 제안된 설계 방안은 설계상의 제한조건으로 인한 오정렬과 회로 및 제어 특성과 같은 높은 제

약조건을 고려하지 않고 페라이트 형상 변경을 통해 전력전송 효율을 평균 약 6.8% 증대하였으며, 이송거리에 따른 효율 차이를 최소화 할 수 있어 실제 시스템에 적용하기 유리할 것으로 기대된다.

추후 코일의 기하학적 형상, 페루프 비, 각도 등 모든 오정렬 요소를 반영하여 코일 최적 설계에 대한 연구를 수행할 예정이다.

후 기

이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 산업기술평가기관리원(KEIT) 연구비지원에 의한 연구임(‘20018493’).

References

- 1) H. R. Ma and C. J. Lee, “Exploring Key Topics and Trends of Government-Sponsored R&D Projects in Future Automotive Fields: LDA Topic Modeling Approach,” *Journal of the Korea Industrial Information Systems Society*, Vol.29, No.1, pp.31-48, 2024.
- 2) H. Yoon, “Analysis of the Recent Trend in Eco-Friendly Vehicles and Their Benefit Efficiency,” *The Journal of Humanities and Social Sciences*, Vol.14, No.1, pp.2855-2868, 2023.
- 3) J. Shin, “A Study of Future Vehicle Design Focused on Change of Technology, Environment and User,” *Journal of Digital Art Engineering and Multimedia*, Vol.8, No.3, pp.351-363, 2021.
- 4) Y. S. Park, “A Study on Mobility Furniture Composition for a Segment Model Proposal for Autonomous Driving Cars,” *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol.23, No.4, pp.370-376, 2022.
- 5) S. Kim, K. Kim, D. Ko and J. Nam, “A Study on Design of Multi-Function Mobility Modular Appliances,” *Transactions of KSAE*, Vol.32, No.12, pp.993-1002, 2024.
- 6) J. Y. Kwon and D. Y. Ju, “Analysis and Classification of In-Vehicle Activity Based on Literature Study for Interior Design of Fully Autonomous Vehicle,” *Journal of the HCI Society of Korea*, Vol.13, No.2, pp.5-20, 2018.
- 7) J. Lee, H. Lee, G. Koo, H. Kim and H. Sagong, “Study on Reliability of Wireless Power Transfer Module for Automotive Seat,” *KSAE Annual Conference Proceedings*, 2023.
- 8) Y. J. Byun, “A Study on Factors Involved in Interior Instrument Panel Design of Autonomous Vehicles,” *Journal of the Korean Society of Science and Art*, Vol.40, No.4, pp.169-180, 2022.
- 9) S. B. Lee and I. G. Jang, “Structural Optimization for Railway Wireless Power Transfer Systems,” *KSME Annual Conference Proceedings*, 2013.
- 10) G. Lee and B. S. Lee, “Introduction of Domestic Railway Wireless Power Transfer Technology,” *The Journal of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol.69, No.7, pp.18-23, 2020.
- 11) G. Lee, M. Y. Kim, C. Lee, D. Jang, B. S. Lee and J. H. Kim, “Electromagnetic Field Tests of a 1-MW Wireless Power Transfer System for Light Rail Transit,” *Energies*, Vol.14, No.4, Paper No.1171, 2021.
- 12) J. C. Kim, W. Y. Ji, C. B. Park, J. B. Lee, G. Jeong and H. W. Lee, “Design Considering the Impedance of Induction Heating System for 200W-Class Railway Turnout,” *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol.23, No.11, pp.1124-1132, 2020.
- 13) C. S. Shin, C. H. Jo, S. J. Kang and D. H. Kim, “Design of Wireless Charging Pad for Power Seat Considering Leakage Magnetic Flux According to Material and Shape of Surrounding Fixture,” *The Korean Institute of Power Electronics Annual Conference Proceedings*, pp.435-436, 2023.
- 14) S. M. Kim, J. I. Moon, J. Y. Kim, J. W. Lee and I. K. Cho, “Design and Implementation of the Wireless Power Transfer Module for 70W Car Seat,” *The Korean Institute of Electrical Engineers Annual Conference Proceedings*, pp.10-12, 2019.
- 15) S. Lee, H. Kim and M. Kim, “Adverse Health Effect Analysis of Long-Rail Wireless Power Transmission System for Automotive Seat,” *The Korean Institute of Electrical Engineers Annual Conference Proceedings*, pp.18-19, 2023.
- 16) D. Na, J. Nam and D. Ko, “Power Efficiency Analysis of Wireless Power Transfer System for Automotive Seats Based on Finite Element Method,” *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol.48, No.12, pp.805-813, 2024.
- 17) D. Na, J. Nam and D. Ko, “Investigation of Electromagnetic Wave Exposure on a Magnetic Induction Wireless Power Transfer System Based on the Finite Element Method,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol.23, No.9, pp.65-74, 2024.
- 18) C. H. Jeong, H. S. Choi and S. J. Choi, “Graphical Analysis and Design for Asymmetric Energy Link in Series-Series Configuration of Inductive Power Transfer,” *Journal of Power Electronics*, Vol.19, No.6, pp.1440-1448, 2019.
- 19) S. Lee, D. M. Kim, S. Kim, J. Lim, J. Lee, J. Noel and D. Kim, “A High Efficiency Wireless Power Transfer

Drone Coil Structure for Interoperability and Robust Misalignment,” Journal of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol.34, No.5, pp.385-398, 2023.

20) C. B. Park, “A Study of the High-Efficiency Coreless-Typed Wireless Power Transfer System for Railway Transit,” Journal of Electrical Engineering and Technology, Vol.11, No.5, pp.1305-1310, 2016.