

# 철도 적용 무선전력전송시스템을 위한 최적설계 방법론 개발

## DEVELOPMENT OF THE OPTIMIZATION FRAMEWORK FOR WIRELESS POWER TRANSFER SYSTEMS APPLIED TO RAILWAY

이승범\*, 장인권\*†

Seung Beop Lee\*, In Gwun Jang\*†

**Abstract** Wireless power transfer (WPT) systems in railway systems, as a multidisciplinary complex problem, are required to efficiently improve an objective function (e.g. transfer efficiency, mass of a system) while satisfying various constraint functions such as electromagnetic field (EMF), air-gap, and power capacity transferred. In this paper, the optimization framework for the railway-specific wireless power transfer systems was developed and applied to minimize the mass of a wireless power transfer system. After optimization, the mass of the system could be decreased by 28.6% while transmission capacity and EMF were satisfied. The proposed framework would help us to reduce time and cost for development.

**Keywords :** Wireless power transfer systems, optimization framework, EMF, transmission capacity

**초 록** 무선전력전송 시스템의 철도적용은 대표적인 다학제적 복잡문제 중 하나로서, 실제 현장적용을 위해서는 다양한 제한조건(전송효율, 전송용량, 전송거리, EMF 기준 등)을 만족시키는 범위에서 정해진 목적함수(시스템무게, 전송효율, 전송용량, 전송거리 등)를 향상시킬 수 있어야 한다. 본 연구는 이에 대한 효과적인 해결책으로써 철도적용 무선 전력전송 시스템을 위한 최적설계 방법론을 개발하고, 이를 무선전력전송 시스템의 무게 최소화에 적용하였다. 그 결과 무부하시, 전송 용량과 EMF 조건을 만족하면서 시스템의 무게를 28.6% 감소시킬 수 있었다. 본 연구에서 제안한 방법론은 향후 복잡한 철도시스템의 개발에 소요되는 비용과 시간의 단축에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 기대한다.

**주요어 :** 무선전력전송시스템, 최적설계, 출력밀도, 전송용량, EMF

### 1. 서 론

철도 시스템에서의 무선전력전송은 기존의 전차선과 판토타그래프를 이용한 접촉식 전력공급시스템을 벗어나, 무선으로 전력을 공급하는 비접촉 방식의 전력공급시스템을 의미한다. 무선전력전송은 기존의 방식에 비해, 전력 공급을 위한 고가 구조물이 불필요하며, 터널의 단면적 감소로 인한 건설비 절감이 가능하며, 또한 판토타그래프의 접촉으로 인한 마모를 피할 수 있다.

온라인 버스[1]와 무가선 트램을 위한 무선전력전송 시스템의 개발 및 공개시연은 대전력 무선전력전송의 가능성을 제시하였다.

† 교신저자: 한국과학기술원 조천식 녹색교통대학원(igjang@kaist.edu)

\* 한국과학기술원 조천식 녹색교통대학원

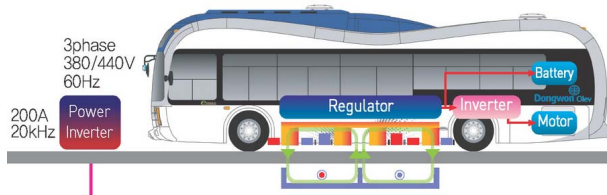


Fig. 1 KAIST OLEV BUS



Fig. 2 KRRI Wireless Tram

이제는 무선전력전송의 구현 가능성을 넘어, 효율적인 무선전력전송시스템의 개발이 요구되고 있다. 무선전력전송 시스템은 다학제적인 복잡 시스템(multidisciplinary complex system)으로서, 효율적인 설계를 위해서는 설계자의 경험이나 직관에 의존한 기존의 설계 방식이 아닌, 설계변수 간의 결합 효과(coupling effect)와 다수의 제한조건에 대한 고려가 가능한 최적설계의 적용을 필요로 한다. 최적설계는 주어진 제한조건을 만족시키는 범위 내에서 지정된 목적함수를 최대 또는 최소화하는 설계를 도출해주는 수학적 방법론을 지칭하며, 현재 다양한 공학 분야에서 널리 사용되고 있다.

무선전력전송과 관련된 최적설계의 적용사례로는, 실험계획법과 반응표면법을 사용하여 자기공명장치(MRI)의 균일 자기장 형성을 위한 치수 최적화 연구가 있었다[2]. 다만, 최적화의 과정이 수동적이고, 방법론의 특성상 제한조건들의 처리가 힘들다는 한계가 있다. 무선전력전송의 효율을 향상시킬 수 있는 인자들 중, 2개의 설계변수들에 대해 일정범위 안에서의 섭동을 수행함으로써 전송효율을 변화를 파악하고, 이를 통해 최대화하는 연구도 있었다[3-6]. 이 경우, 모든 설계변수 간의 결합 효과를 고려할 수 없고, 제한 조건을 고려할 수 없다는 단점이 있다.

본 연구에서는 다양한 설계변수와 다수의 제한조건을 고려할 수 있는 철도적용 무선급집전 시스템을 위한 체계적이고 효율적인 최적설계 방법론을 구축하고, 이를 활용하여 최적의 철도적용 무선전력전송 시스템을 도출하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 철도적용 무선전력전송 시스템을 위한 최적설계 방법론 구축

무선전력전송 시스템을 위한 최적설계 방법론을 구축하기 위해, 전자기장 해석프로그램인 Maxwell과 최적설계 프로그램 간의 연계를 위해 내부 프로그램을 구성하였고, 최적화 과정 동안의 정보교환은 ASCII 파일을 통해 수행하였다. 구축된 최적설계의 흐름도는 Fig. 3와 같다. 우선 최적설계 모듈이 Maxwell에 초기 설계변수값을 제공한다. Maxwell은 주어진 설계변수에 대해 transient analysis를 수행하여, 유도전압과 유도전류를 확보한다. 그 후, Eddy current analysis를 수행하여 EMF 값을 얻는다. 목적함수와 제한조건과 관련된 유도전압, EMF값 등은 유한차분법(finite difference method)에 의한 설계변수들의 민감도 계산과 수렴조건을 검사하기 위해 최적설계 모듈로 전송된다. 수렴조건 점검 시, 조건을 만족한다면 위의 과정은 마무리된다. 만약 수렴조건을 만족하지 못한다면 개선된 설계변수 값들에 대해

Maxwell의 재해석을 수행하고, 수렴조건을 만족할 때까지 위의 과정을 반복 수행하게 된다.

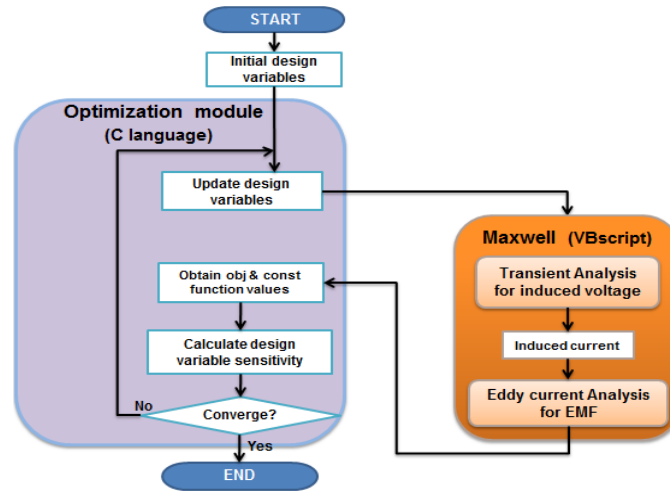


Fig. 3 Flow chart of the optimization framework

## 2.2 철도적용 무선전력전송 시스템에 제안 방법론 적용

### 2.2.1 철도 무선전력전송 시스템의 모델링

철도 무선전력전송을 위한 급집전모델은 KAIST에서 개발한 자기공진 형상화 기술(Shaped Magnetic Field Resonance)를 이용한 것으로, Fig. 4와 같다. 주황색 부분이 Coil이고 파란색 부분이 Ferrite를 나타낸다.

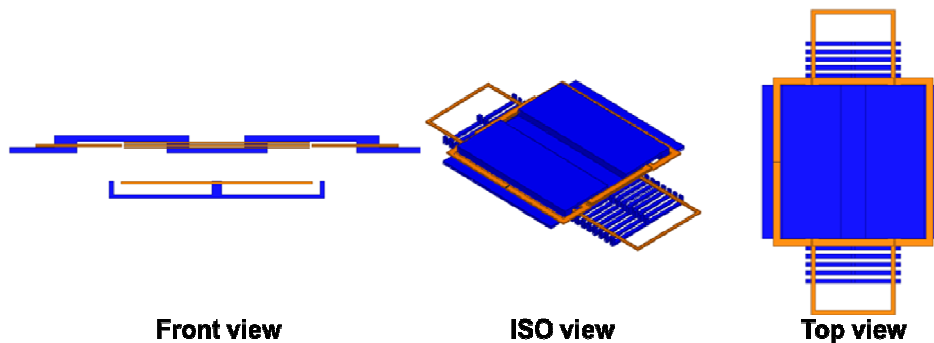


Fig. 4 Front, ISO, and Top view of source and pick-up module

### 2.2.2 철도 무선전력전송 시스템을 위한 최적화 수식

Fig. 4에 표현된 시스템에 대해, 제한조건인 EMF 기준치인 62.5mG를 만족시키고[7,8], 구조물 간의 물리적 역전현상이 일어나지 않도록 하며, 에너지 전송용량을 동일하게 유지할 수 있는 조건 하에서, 목적함수인 급집전 시스템의 질량을 최소화할 수 있도록 최적화 수식화를 설정하였다. 이와 관련한 수식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Maximize} && \text{(Mass of a pick-up module and power system)} \\
 & \text{Subject to} && |(Induced voltage_j)| \leq |1200 \pm 60| \quad [V] \\
 & && \text{(EMF)} \leq 62.5 \quad [mG] \\
 & && \text{(Dimensions of a structure)} \leq (\text{allowable distances}) \quad [mm] \\
 & && a_{lb} \leq a_i \leq a_{ub}, \quad i = 1, 2, \dots, 24, \quad j = 1, 2, \dots, 8
 \end{aligned}$$

### 2.2.3 최적화를 위한 설계변수 선정

최적화를 위한 구조적 설계변수는 Fig. 5에 나와있듯이 총 25개이며, 각각의 변수들에 대한 상한 및 하한조건들은 담당자의 조언 및 합리적인 범위 안에서의 가정을 통해 설정하였다.

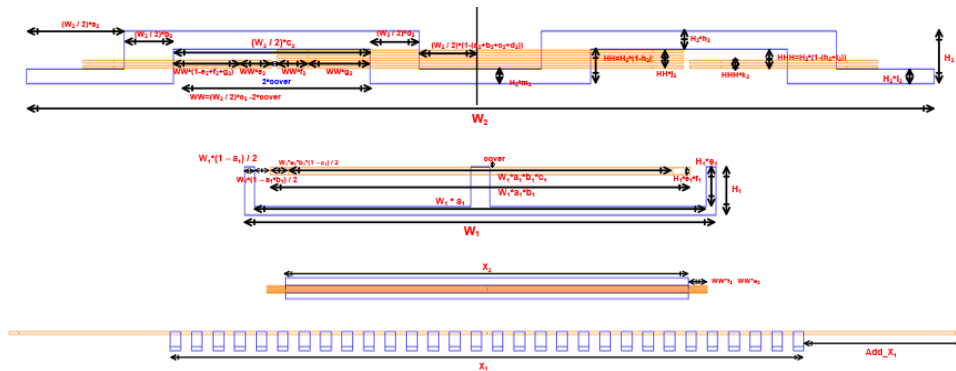


Fig. 5 Structural design variables for the pick-up module

### 2.2.4 최적설계 결과

Fig. 6은 4번째 축차 이후 모든 제한조건들이 가용영역(feasible region)으로 진입하고, 목적 함수가 84kg에서 60kg으로 28.58% 감소한 것을 보여준다. Table 1은 최적설계에 대한 결과로서, 최적화 과정 동안의 축차가 9번, 함수 호출(functions calls)이 337번, 총 해석시간은 84.25시간이 걸린 것을 알 수 있다. Fig. 7은 무선급전 시스템의 초기 모델과 최적화된 모델을 비교하고 있다.

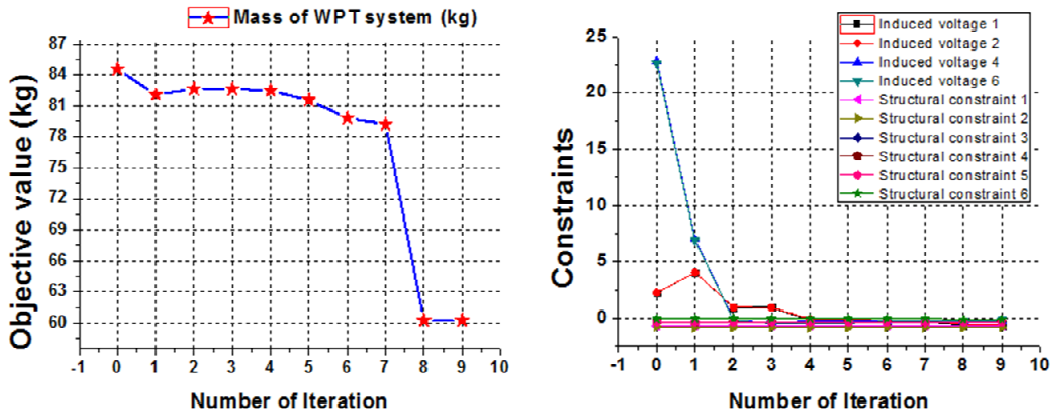


Fig. 6 Optimization history of the objective and constraints function for the railway

Table 1 Optimization results for the railway

| Category                 |      | Value |
|--------------------------|------|-------|
| Mass of pick-up device   | [kg] | 60    |
| Number of iteration      |      | 9     |
| Number of function calls |      | 337   |
| Total calculation time   | [Hr] | 84.25 |



Fig. 7 Comparison between initial and optimized model

Fig. 8은 관련 규정 상의 위치에서의 EMF 측정값들을 나타내고[7,8], Table 2는 세 측정 지점의 합에 대한 평균값을 나타내고 있다. 즉, 초기 설계와 최적화된 설계 모두 제한조건 (62.5mG)을 만족하고 있음을 알 수 있다.

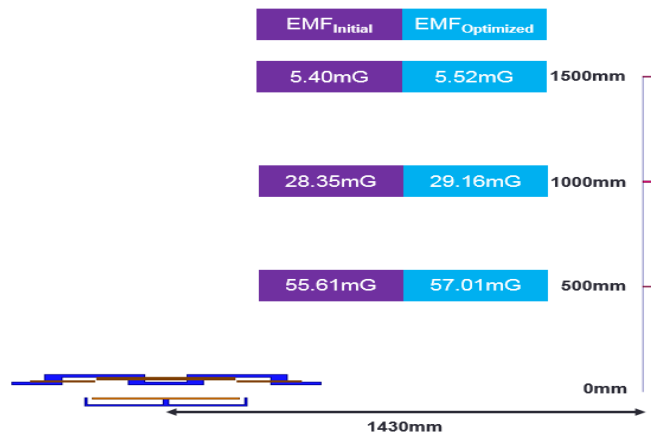


Fig. 8 EMF values at measure point

Table 2 EMF values for the railway

| Category                     | Value    |
|------------------------------|----------|
| Average EMF at initial point | 29.78 mG |
| Average EMF at optimal point | 30.56 mG |

### 3. 결론

본 연구에서는 철도적용 무선급집전 시스템의 최적화를 위해, 다양한 설계변수와 측정치들을 고려할 수 있는 체계적이고, 효율적인 최적설계 방법론을 제안하였고, 선정된 제한조건을 만족시키는 범위에서 목적함수인 무선급집전 시스템의 질량을 성공적으로 최소화할 수

있었다. 본 최적설계 방법론을 확대 적용할 경우, 다양한 제한조건 및 목적함수(EMF, 전송 거리, 전송용량, 전송효율, 크기, 무게 등)에 대해 이를 충족하는 설계안을 효과적으로 도출할 수 있을 것이며, 제품개발에 소요되는 인력과 비용을 단축시킬 수 있을 것이다.

추가적인 연구를 통해 철도시스템 특성에 맞춘 최적설계 알고리즘을 개발/적용하여 방법론의 성능 및 안정성을 더욱 향상시킬 수 있다면, 가까운 시일 내에 국내 관련 산업계에 적용되어 기술 경쟁력을 제고하는데 크게 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

## 후 기

본 연구는 한국철도기술연구원에서 수행하고 있는 "미래 녹색철도 시스템 기술 개발" 사업 부분지원을 받아 이루어졌음을 밝힙니다. 그리고 또한 국토교통부 철도특성화대학원 지원사업의 부분지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] S.W. Lee, J. Huh, C.B. Park, N.S. Choi et. al. (2010) On-Line Electric Vehicle using Inductive Power Transfer System, *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), IEEE*, pp.1598 – 1601.
- [2] J.H. Lee, J.H.Yoo (2008) Optimal Design of an MRI Device Considering the Homogeneity of the Magnetic Field, *Korean Society of Mechanical Engineers*, pp.654-659.
- [3] A.K. RamRakhyani, S. Mirabbasi, M. Chiao (2011) Design and Optimization of Resonance-Based Efficient Wireless Power Delivery Systems for Biomedical Implants, *IEEE Biomedical Circuits and Systems*, pp. 48-63.
- [4] H.C. Son, J.W Kim, Y.J. Park, K.H. Kim (2010) Efficiency Analysis and Optimal Design Method of a Circular Loop Resonant Coil for Wireless Power Transfer, *Korea Electro technology Research Institute(KERI)*, pp. 1069-1071
- [5] Y.H. Kim, S.Y. Kang, M.L. Lee, B.G. Yu, T.Y. Zyung (2009) Optimization of Wireless Power Transmission through Resonant Coupling, *IEEE Compatibility and Power Electronics*, pp. 426-431
- [6] S. Ahn, J.Y. Lee, D.H. Cho, J. Kim (2011) Optimization of Wireless Power Transfer System in On-line Electric Vehicle, *Fall conference of Korean institute of electrical engineers*, Korean institute of electrical engineers, pp.20-22
- [7] S. Ahn et al. (2010). Low Frequency Electromagnetic Field Reduction Techniques for the On-Line Electric Vehicle (OLEV), *IEEE Electromagnetic Compatibility (EMC)*, pp. 625 - 630.
- [8] S. Ahn et al. (2010). Magnetic Field Design for High Efficient and Low EMF Wireless Power Transfer in On-Line Electric Vehicle, *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, pp. 3979-3982.